NANOTUBOS: EL FUTURO DE LA ELECTRONICA • POLVO ESTELAR

INVESTIGACION y CIENCIA

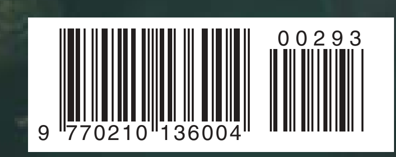
FEBRERO 2001
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

BIOQUIMICA DEL ALZHEIMER

EL DESARROLLO URBANO

LOS SEÑORES DE LOS MARES JURASICOS



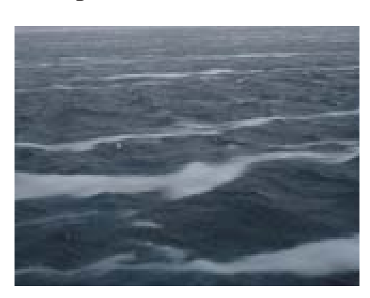


Febrero de 2001 Número 293

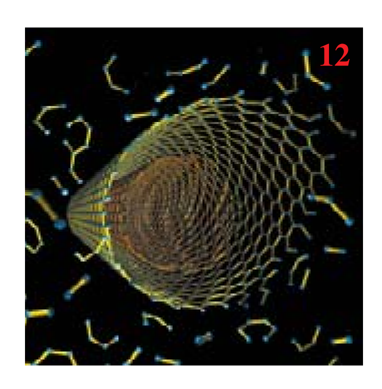
SECCIONES













Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**





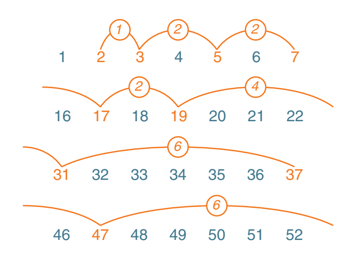






SECCIONES









Portada: Karen Carr

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-5	Karen Carr
6	Tomo Narashima y Cleo Vilett
7	Ryosuke Motani (*arriba*); Museum für Naturkunde Stuttgart (*abajo*)
8	Ed Heck
9	K. Carr; A. Smucker (*vértebras*)
10	Tomo Narashima (*animales*); Edward Bell (*anillo*); Ryosuke Motani (*foto*)
11	Ryosuke Motani
12-13	Slim Films (*izquierda*); Cees Dekker (*centro*); P. G. Collins y P. Avouris (*derecha*)
14	W. Wayt Gibbs (*arriba* y *derecha*); Cleo Vilett (*izquierda*); J. Cumings y A. Zettl (*centro*)
15	P. G. Collins y P. Avouris
16	Ise Electronics (*izquierda*); Samsung Advanced Institute of Technology y Samsung SDI (*derecha*)
17	Laboratorio Nacional Oak Ridge (*arriba*); Hongjie Dai (*centro*); Cleo Vilett (*abajo*)
18	Charles M. Lieber (*ADN*); T. Rueckes *et al.*, *Science*, n.º 5476, ©2000 AAAS (*RAM*); Reproducido con permiso de C. A. Mirkin, *Science*, vol. 286, n.º 5447, ©1999 AAAS (*nanopinzas*); J. Cumings y A. Zettl (*sensores*); Rüdiger R. Meyer *et al*. (*almacenamiento de hidrógeno*); Charles M. Lieber (*microscopio de barrido*); Min-Feng Yu *et al. Science*, n.º 5453, ©2000 AAAS (*prueba de tensión en nanotubos*)
19	Laurie Grace
22-23	Slim Films
24-25	Laurie Grace (*ilustración*); Philip Damiani (*fotografías*)
26	Klein/Hobert (*arriba*); Rob McEwan (*abajo*)
28	Gerry Ellis (*guepardo*), Charles V. Angelo (*bongo*), Frans Lanting (*panda*), John Cancalosi (*bucardo*), Roland Seitre (*gaúr*), Martin Wendler (*ocelote*)
42-45	©Observatorio Anglo-Australiano/ Real Observatorio de Edinburgo; Cleo Vilett (*gráfico*)
46	Don Dixon
47	Loek Zuiderduin
51	Ed Kashi
52	John W. Karapelou
53	Peter H. StGeorge-Hyslop
54	Catherine Bergeron y Robert D. Terry
55	John W. Karapelou
56-57	Peter H. StGeorge-Hyslop
58-59	David Feder y Peter Ketcham (*NIST*) (*izquierda*); Kirk Madison (*derecha*)
60	John F. Allen; Cortesía de Russell Donnelly
61	S. L. Cornish *et al*., *Physical Review Letters*, vol. 85, 2000
62	Steven L. Rolston (*arriba*); Dallin Durfee y Michael Andrews (*abajo*)
63	Steven L. Rolston
64	Sam Ogden
65	Chris H. Greene
66-74	A. Polls, J. Boronat y F. Mazzanti
76-77	Cortesía de Duany Plater-Zyberk & Co. (*izquierda*); Urban Design Associates (*derecha*)
78-79	Cleo Vilett, fuente: City of Austin PECSD
80	Paul A. Souders
81	Cortesía de Duany Plater-Zyberk & Co. (*tres superiores*); Richard McLaughlin (*abajo*)
82-83	Duany Plater-Zyberk & Co. (*arriba*); Michael Morrissey (*abajo*)

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

José Joaquín Moratalla: *Los señores de los mares jurásicos*; Juan Pedro Adrados: *Introducción de los nanotubos en el dominio de la electrónica*; José Folch: *Clonación del Arca de Noé*; M.ª Rosa Zapatero Osorio: *El polvo estelar*; Esteban Santiago: *Componentes de la enfermedad de Alzheimer*; Juan Pedro Campos: *El gas más frío del universo*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
ON-LINE EDITOR Kristin Leutwyler
EDITORS Mark Alpert, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky, George Musser, Sasha Nemecek y Sarah Simpson
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.500 pta.	21.500 pta.
	69,12 euro	129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

QUÍMICA Y REACTORES. «En un extenso informe sobre química de los reactores nucleares John A. Swartout, del Laboratorio Nacional de Oak Ridge, revela que tales investigaciones han abierto el nuevo campo de la "química de las altas temperaturas". Señala que, en el pasado, la mayoría de las investigaciones químicas se llevaron a cabo a temperatura ambiente y se dispensó escasa atención a las reacciones producidas por encima de los 100 grados centígrados. En el programa de desarrollo de reactores para generación de energía, los químicos deben estudiar de qué modo reaccionan los compuestos químicos a temperaturas muy superiores a la citada.»

EL RESFRIADO COMÚN. «Desde 1946, la Unidad de Investigaciones sobre el Catarro Común, del Consejo de Investigaciones Médicas de Salisbury (Inglaterra), ha estado atacando el problema del resfriado común. De 2000 voluntarios, los que recibieron las inoculaciones de control inofensivas se mantuvieron satisfactoriamente libres de catarros durante su estancia de 10 días. De los que recibieron las secreciones activas tomadas de personas resfriadas, aproximadamente la mitad se acatarraron. Un aspecto interesante es que muchos de los inoculados con sustancias activas parecían comenzar a acatarrarse al segundo o tercer día, pero en la jornada siguiente habían desaparecido todos los síntomas y, con ellos, el catarro en ciernes. No cuesta entender por qué los fármacos que pretenden curar el catarro común tantas veces se hacen con una fama totalmente inmerecida.»

...cien años

TIFOIDEA Y GUERRA. «En todas las guerras la fiebre tifoidea ha causado bajas en número no sólo mayor que las heridas producidas por las armas, sino incluso mayor que cualquier otra enfermedad. El reciente informe de la comisión nombrada para investigar las distintas causas de óbito entre nuestros soldados durante la guerra hispano-norteamericana afirma que la fiebre entérica fue responsable de la gran mayoría de las muertes. Lo necesario es un método eficaz para depurar el agua potable. Según la Revista Médica, el filtrado "resulta demasiado tedioso a efectos prácticos con grandes contingentes de soldados. El hervido es también incómodo". El gobierno alemán se inclina por el bromuro, pero el método de empleo podría parecer harto complicado para aplicarlo con tropas en marcha.»

EL TELÉGRAFO DE TESLA. «Si hemos de creer en lo que se dice, la telegrafía sin hilos a larga distancia está a punto de dar un paso de gigante, pues dentro de poco dispondremos de un medio de comunicación telegráfica sin hilos de uno a otro lado del Atlántico, el cual nos permitirá enviar mensajes a una velocidad mucho mayor que el cable actual. La hazaña la va a realizar el "oscilador" de Nicola Tesla. Todos estamos perfectamente familiarizados con el sistema de Marconi, que transmite ondas hertzianas a través del éter. El señor Tesla, sin embargo, maneja sus recientemente descubiertas "ondas eléctricas estacionarias en la tierra" creando corrientes vibratorias que pueden transmitirse por el globo terrestre, al igual que por un cable, hasta las mayores distancias.»



Transmisor/receptor telefónico de abonado, 1901

ADIÓS, OPERADORA. «Los inventores soñaban con idear algún medio que permitiera a los abonados comunicarse entre sí sin la ayuda de central, y en veinte años se propusieron y ensayaron (y fracasaron) varios aparatos. En Francia, la Direction Générale des Postes et des Télégraphes ha instalado un aparato experimental inventado por un norteamericano y llamado "Auto-Conmutador", que proporciona una comunicación directa y asegura el secreto total de la conversación. Cada abonado dispone de un instrumento (*véase ilustración*) que comprende una batería, un transmisor y receptor, un timbre de llamada y un mecanismo especial representado exteriormente por un disco provisto de números. Este, al moverse, acciona el conmutador situado en la central.»

...ciento cincuenta años

COCINERO ENVENENADOR. «El diario *Patriot*, de Barnstable (Massachusetts), reseña que una carta recibida del capitán William Loring, del bricbarca *Gobernador Hinckley*, explica que, a los 10 días de zarpar de Nueva York rumbo a Londres, el cocinero intentó envenenar a los oficiales y al pasaje introduciendo sustancias venenosas en el café: las víctimas tomaron el café, pero no en cantidad suficiente para que fuera letal para ninguna de ellas. Ahora bien, todo ello pudo haber ocurrido sin la menor intención por parte del pobre cocinero. Si el café se mantiene caliente en un recipiente de cobre durante cinco o seis horas, disuelve parte del cobre y se transforma en una bebida ponzoñosa. El café no debe mantenerse en recipientes metálicos que no sean de estaño o plata.»



Los ictiosaurios, reptiles pisciformes, reinaron en los océanos durante un tiempo no menor que el del dominio de los dinosaurios sobre tierra firme. Los paleontólogos comienzan a entender las razones de tamaño éxito

Es un día de otoño de hace 160 millones de años. En pleno Jurásico. Los dinosaurios son amos y señores de tierra firme. El sol del atardecer baña las aguas de un océano verde-azulado; una sombra se desliza sigilosa sobre los oscuros riscos de una cordillera volcánica sumergida. Cuando el animal emerge, parece una ballena que saliera a respirar, pero no lo es. (Las ballenas tardarán todavía 100 millones de años en llegar.) La sombra retorna rauda. Dobla la altura de una persona. El giro resulta aterrador para un banco de algo parecido a calamares que observan su hocico abierto y ribeteado de dientes amenazadores.

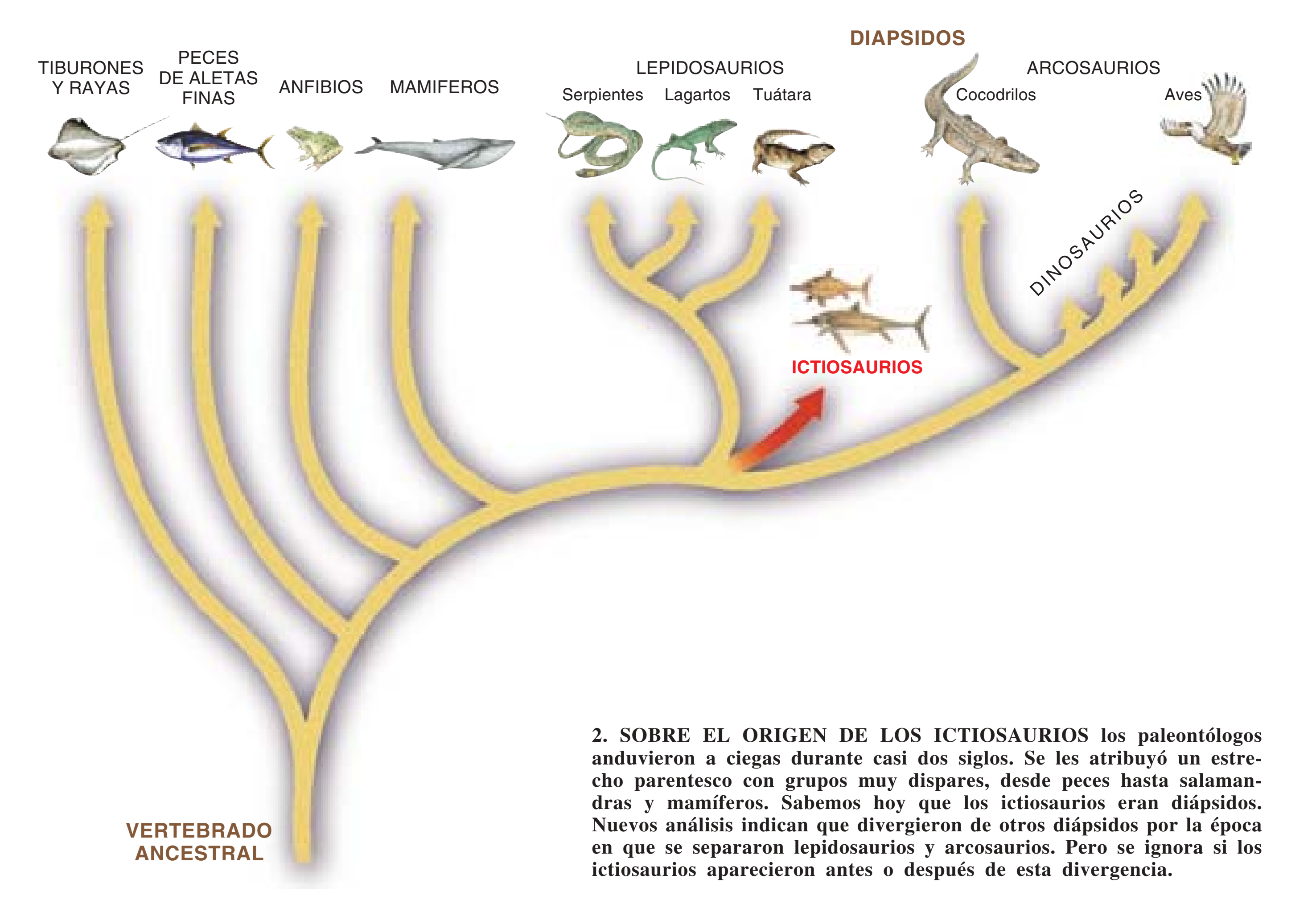
Se trata de un *Ophthalmosaurus*, perteneciente al grupo de monstruos marinos llamados ictiosaurios o saurios-peces. Se conocen más de 80 especies. La de tamaño menor no superaba las dimensiones de un brazo humano; la mayor excedía de 15 metros. *Ophthalmosaurus*, de talla intermedia, no fue el más agresivo. Su compañía debió de ser mucho más placentera que la del feroz *Temnodontosaurus* o "lagarto de dientes cortadores", en cuya dieta entraban incluso grandes vertebrados.

Los señores de los mares jurásicos

Ryosuke Motani



1. LOS ICTIOSAURIOS fueron amos y señores de los océanos durante 155 millones de años.



2. SOBRE EL ORIGEN DE LOS ICTIOSAURIOS los paleontólogos anduvieron a ciegas durante casi dos siglos. Se les atribuyó un estrecho parentesco con grupos muy dispares, desde peces hasta salamandras y mamíferos. Sabemos hoy que los ictiosaurios eran diápsidos. Nuevos análisis indican que divergieron de otros diápsidos por la época en que se separaron lepidosaurios y arcosaurios. Pero se ignora si los ictiosaurios aparecieron antes o después de esta divergencia.

Cuando los paleontólogos descubrieron los primeros ictiosaurios fósiles, a principios del siglo XIX, la visión de estos monstruos enormes les desconcertó. No se sabía todavía de la existencia de los dinosaurios. Por tanto, cada rasgo insólito de los ictiosaurios les resultaba intrigante y misterioso. El examen de los fósiles reveló que los ictiosaurios no habían evolucionado a partir de peces, sino de animales terrestres, descendientes a su vez de peces. ¿Cómo se produjo, en los ictiosaurios, la vuelta a una vida acuática? ¿Con qué otros animales estaban más emparentados? ¿Por qué adquirieron características tan curiosas como una columna vertebral que parecen “discos” de hockey apilados y unos ojos que semejan bolas de una bolera?

Pese a estas pertinentes cuestiones, el momento de descifrar la enigmática transformación desde animales terrestres hasta habitantes de los mares abiertos hubo de esperar casi doscientos años. Mientras que *Iguanodon* y otros dinosaurios acaparaban la atención de los paleontólogos en los años treinta del siglo XIX, las novedades que proporcionaban los saurios-peces quedaron postergadas. El interés por los señores de los mares jurásicos renació hace escasos años, gracias a nuevos fósiles procedentes de Japón y China. Desde entonces, el progreso en su conocimiento ha sido muy rápido.

Oscuros orígenes

Aunque la mayoría olvidó a los ictiosaurios en los comienzos del siglo XIX, algunos paleontólogos no se los quitaron nunca de la mente. Desde su hallazgo quedó claro el feliz acierto de las adaptaciones de los ictiosaurios para la vida acuática. La distribución temporal de los fósiles reveló que se enseñorearon del océano a lo largo del intervalo entre hace unos 245 y hace unos 90 millones de años, más o menos la franja temporal del dominio de tierra firme por los dinosaurios. Han aparecido fósiles de ictiosaurios por todo el mundo, signo de una amplia migración, a la manera de las ballenas actuales. A pesar de su apariencia pisciforme, los ictiosaurios fueron reptiles de respiración aérea. No tenían branquias, y las características de sus cráneos y mandíbulas eran inequívocamente reptilianas. Además, poseían dos pares de extremidades (los peces no tienen ninguna), lo que implicaba que sus antecesores vivieron alguna vez en tierra firme.

Los paleontólogos llegaron a estas conclusiones a partir de los esqueletos de los ictiosaurios avanzados, en perfecto estado de conservación. Pero hasta 1927 no se hallaron restos de ictiosaurios antiguos. En el curso de su evolución, los primitivos adquirieron un cuerpo pisciforme: extremidades transformadas en aletas, aparición de una cola no ósea y de una aleta

HECHO: El menor de los ictiosaurios era más corto que un brazo humano; el mayor era

RYOSUKE MOTANI, nacido en la japonesa Tokuyama, se halla adscrito al departamento de paleobiología del Real Museo de Ontario en Toronto. Inició su formación en la Universidad de Tokyo, doctorándose en la de Toronto con una tesis sobre la evolución de los ictiosaurios.

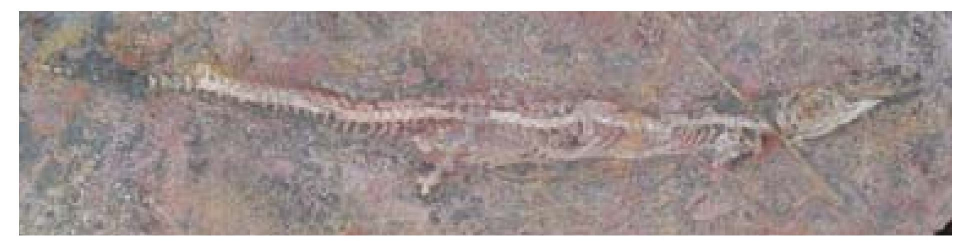
dorsal. No sólo estos avances permitieron a los ictiosaurios vivir en el agua, sino también desenvolverse en mar abierto, lejos de la orilla. Estas adaptaciones extremas a la vida acuática implicaban la pérdida de caracteres clave —ciertos huesos de la muñeca y del talón—, lo que dificultaba la tarea de buscarles relación con sus parientes en tierra. Sin esqueletos completos de los primeros ictiosaurios, cabía sólo especular sobre el aspecto de estos lagartos con aletas.

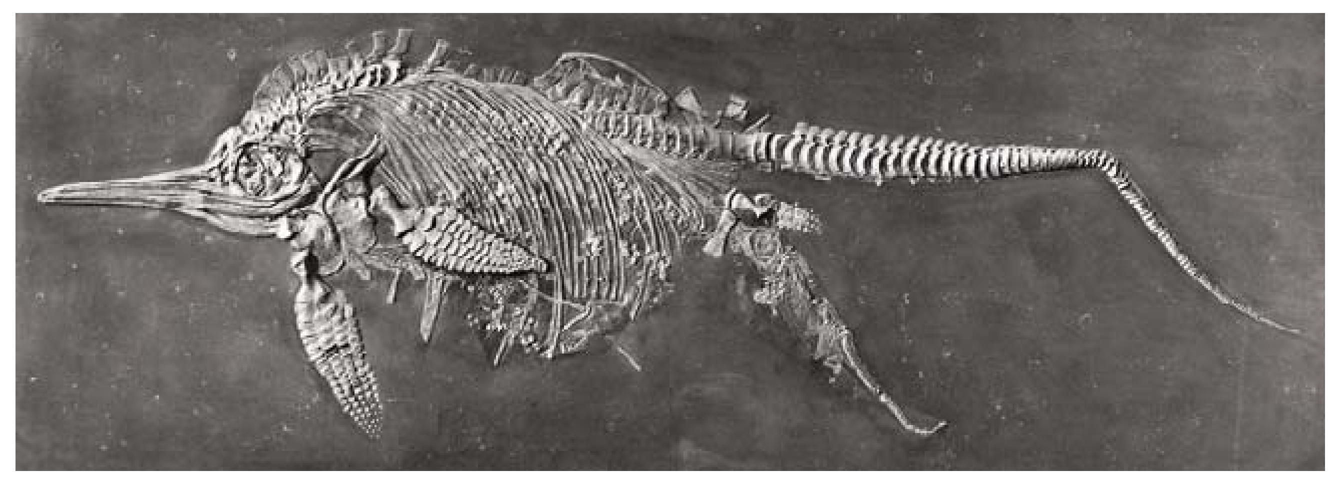
La ausencia de pruebas confundió a los científicos. Los emparentaron no sólo con lagartos y cocodrilos, sino también con anfibios y mamíferos. Mas, a lo largo del siglo XX, se progresó en el conocimiento de las relaciones existentes entre varias especies animales. Aplicando los nuevos métodos, los paleontólogos empezaron a admitir que los ictiosaurios eran reptiles del grupo Diapsida, donde se congregan serpientes, lagartos, cocodrilos y dinosaurios. Se ignoraba, no obstante, cuándo crearon rama propia de ese árbol genealógico los ictiosaurios. Hasta que, hace poco, se recuperaron en Asia nuevos fósiles pertenecientes a los ictiosaurios más antiguos.

El primero de los grandes descubrimientos se produjo en la costa nordeste de Honshu, la principal isla de Japón. La playa está dominada por afloramientos de pizarra, una roca negra que se emplea como placas de caligrafía japonesa. Sirve también de refugio para los huesos del más antiguo de los ictiosaurios, *Utatsusaurus*. La mayoría de los especímenes de *Utatsusaurus* han aparecido fragmentados e incompletos, pero un grupo de geólogos de la Universidad de Hokkaido recuperó en 1982 dos esqueletos casi enteros. Estos ejemplares acabaron estando listos para su estudio merced a la dedicación de Nachio Minoura y su equipo, quienes pasaron 15 años preparando los huesos incrustados en la matriz. Debido a la fragilidad de los restos, tuvieron que retirar la roca con sumo cuidado mediante microagujas y ayudados por un binocular.

Cuando la preparación llegaba a su fin, en 1995, Minoura me invitó a integrarme en el equipo investigador. En cuanto vi el esqueleto, supe que *Utatsusaurus* era lo que los paleontólogos andaban buscando durante años: un ictiosaurio que pareciera un lagarto con aletas. Luego, ese mismo año, mi colega You Hailu, entonces en el Instituto de Paleontología de Vertebrados y Paleoantropología de Pekín, me mostró un segundo ejemplar que acababa de descubrirse, el esqueleto más completo jamás encontrado de *Chaohusaurus*, otro ictiosaurio primitivo. *Chaohusaurus* aparece en rocas de edad semejante a las que alojan *Utatsusaurus*, y, como en éste, hasta entonces sólo se habían recuperado restos sueltos. El nuevo espécimen revelaba la silueta de un esbelto cuerpo de lagarto.

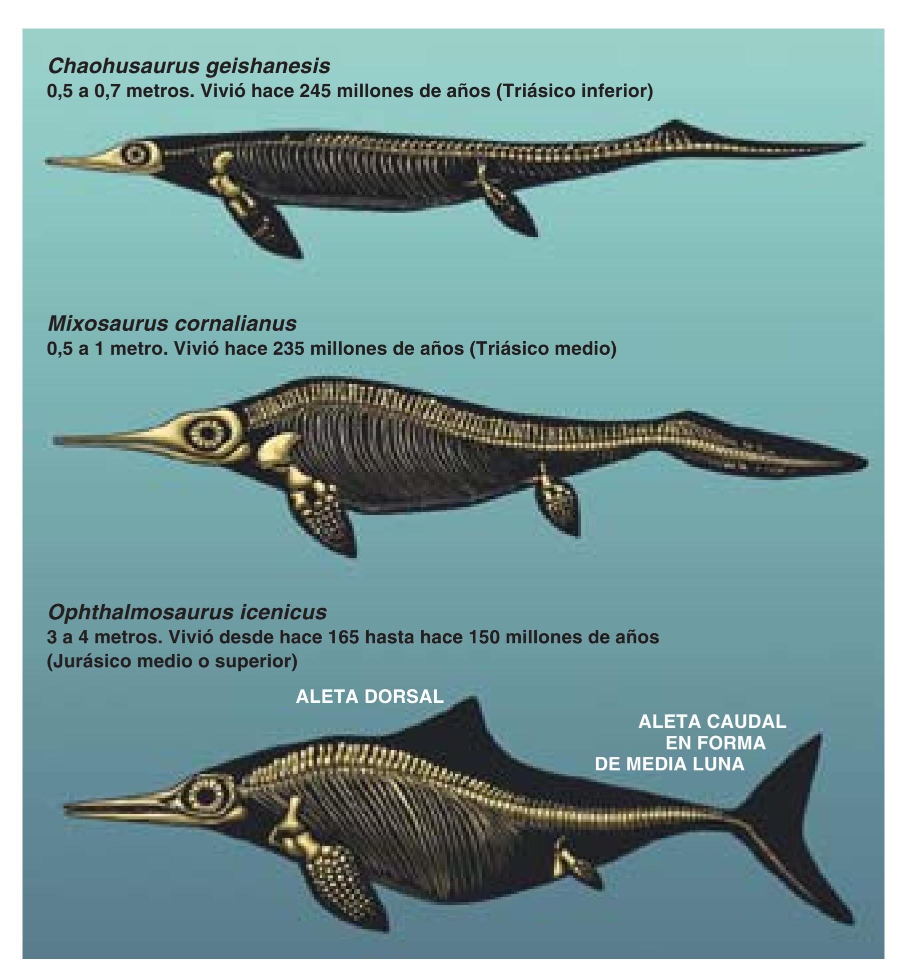
Utatsusaurus y *Chaohusaurus* arrojaban luz sobre el lugar de los ictiosaurios en el seno de la familia de los vertebrados, pues conservan caracteres clave de sus antepasados terrestres. A partir de las configuraciones de cráneo y extremidades, mis colegas y yo pensamos que los ictiosaurios divergieron del resto de los diápsidos cerca de la separación de dos grandes grupos de reptiles actuales, los lepidosaurios (serpientes y lagartos) y los arcosaurios (cocodrilos y aves). Pese a ese hito de la ciencia, el misterio de la evolución de los ictiosaurios permanecía sin resolver.





3. LOS NUEVOS FOSILES de los primeros ictiosaurios, incluido *Chaohusaurus* (*derecha*), han ilustrado de qué modo esos animales en forma de lagarto llegaron a convertirse en los señores del mar abierto, tal como *Stenopterygius*, que aparece debajo con una cría saliendo del canal del parto.

más largo que un autobús urbano



4. GRACIAS A LOS ESQUELETOS ANTIGUOS se ha podido volver a recorrer el camino que condujo desde los cuerpos delgados y lacertiformes de los primeros ictiosaurios (*arriba*) hasta la adquisición de un cuerpo pisciforme con una aleta dorsal y una aleta caudal en media luna.

De pies a aletas

Quizá lo más emocionante del descubrimiento de estos dos ejemplares asiáticos resida en que nos es dado esbozar una interpretación convincente de las adaptaciones que permitieron a sus descendientes ocupar el mar abierto. La transformación más obvia para la vida acuática es la línea que lleva desde los pies hasta las aletas. A diferencia de los huesos delgados de las manos de la mayoría de los reptiles, todos los huesos de las manos de los ictiosaurios son más anchos que largos. Además, todos tienen la misma forma. En la mayoría de los tetrápodos se distinguen sin dificultad los huesos de la muñeca (irregularmente redondeados) de los huesos de la palma (largos y cilíndricos). Más importante aún, los huesos de los ictiosaurios están prietamente empaquetados —sin piel entre ellos— formando un panel sólido. Este empaquetamiento de los dedos dentro de un envoltorio singular de tejidos blandos habría reforzado la rigidez de las aletas, como ha ocurrido en las ballenas, delfines, leones marinos y tortugas marinas. Tales tejidos blandos mejorarían la eficacia hidrodinámica de las aletas debido a que presentan una sección muy delgada, una forma difícil de mantener si los dedos permanecieran separados.

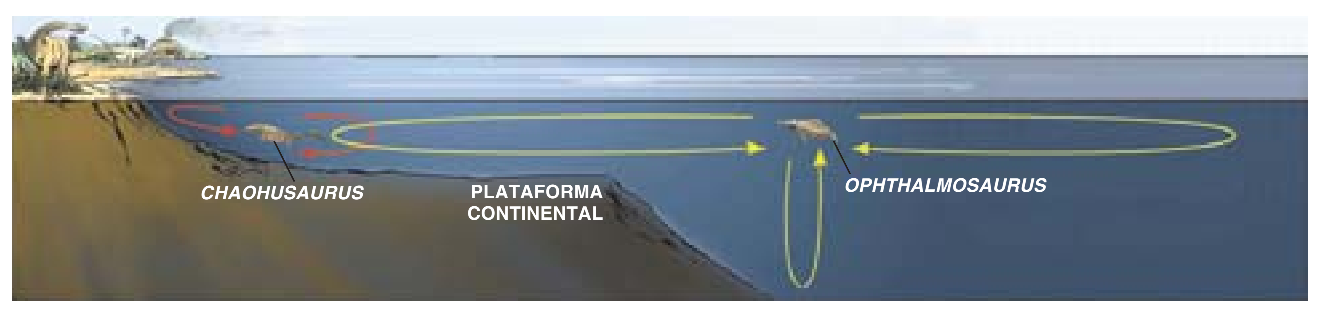
El examen de los fósiles desde las formas lacertiformes hasta las pisciformes —las intermedias, sobre todo— reveló que la evolución desde los pies hasta las aletas no fue mera consecuencia de la modificación de los cinco dedos de los pies. En realidad, los análisis de los miembros de los ictiosaurios dan fe de un proceso evolutivo complejo, en el que algunos dedos se perdieron, aparecieron otros nuevos y posteriormente se dividieron. Examinando la forma de los esqueletos de las aletas a lo largo del árbol filogenético de los ictiosaurios se observa, por ejemplo, que los ictiosaurios pisciformes pierden los huesos del pulgar presentes en las formas más primitivas. Una prueba adicional procede del estudio del desarrollo osteológico de los dedos, u osificación, durante el crecimiento del ictiosaurio pisciforme *Stenopterygius*, del que se han hallado varios ejemplares en diferente estado de desarrollo. Por último, aparecen dedos adicionales a ambos lados de los preexistentes, y algunos de ellos ocupando el lugar del pulgar perdido. No es necesario decir que la evolución no siempre sigue un patrón continuo y direccional de un carácter a otro.

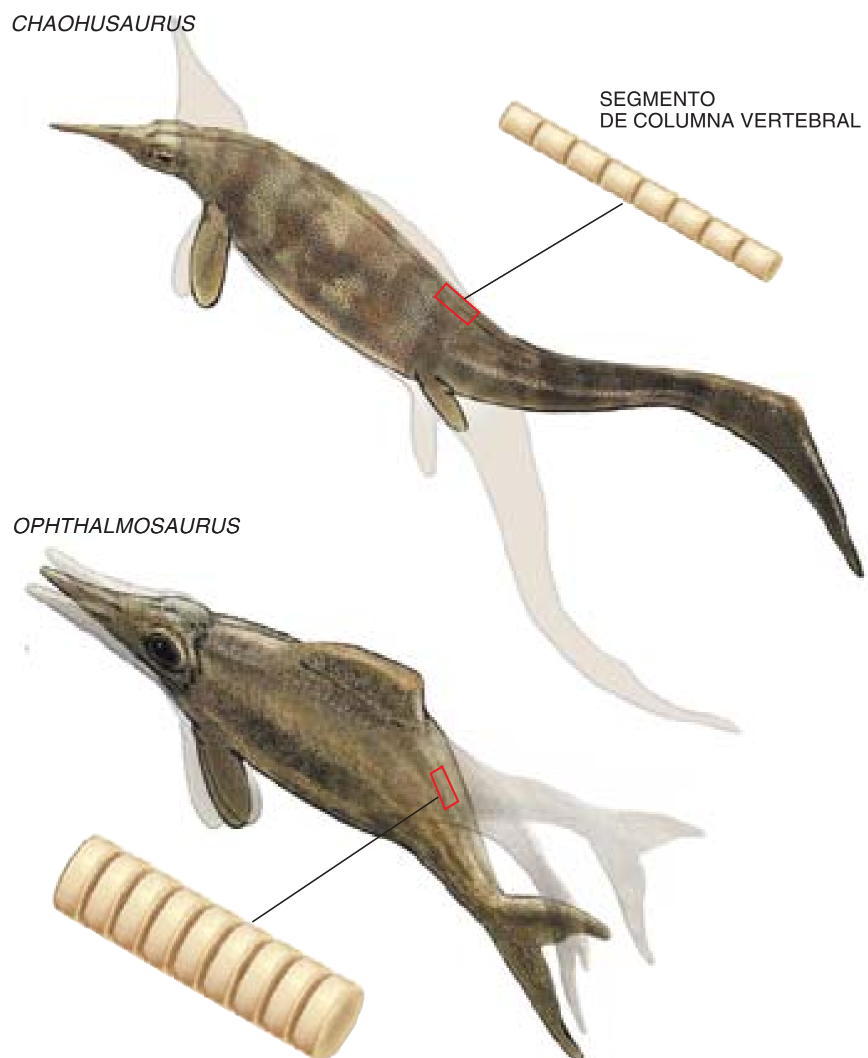
Estructura de la columna para la natación

Los nuevos fósiles lacertiformes han ayudado a resolver el origen de la estructura esquelética de los descendientes pisciformes. Los segundos presentan una columna con vértebras cóncavas parecidas a discos de hockey. Esta forma, aunque poco frecuente entre los diápsidos, se consideraba típica de todos los ictiosaurios. Pero los nuevos ejemplares de Asia han sorprendido a los paleontólogos por la presencia de una columna vertebral más delgada, compuesta de vértebras que, más a que discos de hockey, recuerdan el bote donde se guardan los carretes de 35 mm. Parece que las vértebras crecieron drásticamente en diámetro y se acortaron ligeramente a lo largo de la evolución desde las formas con cuerpos lacertiformes hasta las formas con cuerpos pisciformes. Pero, ¿por qué?

Mis colegas y yo hemos encontrado la respuesta en los estilos de natación de los tiburones actuales. Lo mismo que los ictiosaurios, los tiburones presentan diversas formas y tamaños. Los tiburones gato son delgados y carecen de una aleta caudal alta, como ocurría en los ictiosaurios primitivos. Por contra, los tiburones fusiformes, piénsese en el tiburón blanco, presentan cuerpos más gruesos y una aleta caudal en forma de media luna, similar a los ictiosaurios pisciformes, más avanzados.

HECHO: Ningún otro grupo de reptiles alcanzó jamás un cuerpo tan parecido al de los peces





5. LOS ESTILOS DE NATACION —y también los nichos (*arriba*)— de los ictiosaurios cambiaron conforme evolucionó la morfología de las vértebras. La delgada columna vertebral de los primeros ictiosaurios les permitía un movimiento ondulatorio, anguiliforme (*derecha*). Este movimiento aportaba la rapidez y maniobrabilidad necesarias para cazar en aguas someras. El engrosamiento de la columna en los ictiosaurios avanzados tuvo como consecuencia una mayor rigidez del cuerpo y un movimiento de la cola a un lado y a otro (*debajo*). La rigidez facilita la eficacia energética imprescindible para la navegación en mar abierto.

Estos tiburones nadan únicamente por el balanceo de sus colas, mientras que los tiburones gato ondulan el cuerpo entero. La natación ondulatoria requiere un cuerpo flexible, lo que los tiburones gato consiguen con un gran número de segmentos en su espina dorsal. Tienen unas 40 vértebras en la parte anterior del cuerpo, la misma cifra que contamos en los ictiosaurios housiformes *Utatsusaurus* y *Chaohusaurus*. (Los reptiles actuales y los mamíferos poseen sólo alrededor de 20.)

Los nadadores ondulatorios, así los tiburones gato, pueden maniobrar y acelerar lo suficiente para capturar una presa en aguas relativamente someras de la plataforma continental. Los lagartos actuales también ondulan su cuerpo para nadar, aunque no con la eficacia de los animales de hábitos marinos. Por consiguiente, es lógico concluir que los primeros ictiosaurios —que se parecían a los tiburones gatos y eran descendientes de antepasados lacertiformes— nadaban del mismo modo y vivían sobre la plataforma continental.

La natación ondulatoria permite a un depredador desenvolverse cerca de la orilla, donde abunda la comida, pero no es la mejor elección para un animal que viaja largas distancias en busca de alimento. Los depredadores que cazan en mar abierto, donde las presas menudean menos, precisan un estilo de natación que ahorre energía. Los tiburones fusiformes resuelven el problema gracias a su cuerpo rígido que no ondula con el vaivén de su cola. Una aleta caudal en forma de media luna, que actúa a modo de lámina oscilante, mejora también el rendimiento en la navegación. Los ictiosaurios housiformes presentaban aleta caudal; del perfil grueso de su cuerpo se infiere, además, que nadarían probablemente como los tiburones fusiformes.

El estudio de múltiples especies de tiburones ha revelado que cuanto más grueso y alto sea el cuerpo tanto más crece el diámetro de las vértebras del tronco. Parece ser que los tiburones y los ictiosaurios resolvieron el problema de la flexibilidad desarrollando numerosos segmentos corporales. Conforme el cuerpo de los ictiosaurios fue haciéndose más grueso, en el curso de su evolución, aumentó también el número de vértebras. Para soportar el peso de su cuerpo voluminoso, el grosor de la columna vertebral multiplicó, al menos, una vez y media el de la columna de los primeros ictiosaurios. Por culpa de tal engrosamiento, el cuerpo perdió flexibilidad y las vértebras adquirieron la forma de discos de hockey.

DIAMETRO MAXIMO APROXIMADO DEL OJO:

ELEFANTE AFRICANO
5 CENTIMETROS

BALLENA AZUL
15 CENTIMETROS

OPHTHALMOSAURUS
23 CENTIMETROS

CALAMAR GIGANTE
25 CENTIMETROS

TEMNODONTOSAURUS
26 CENTIMETROS

6. LOS OJOS DE LOS ICTIOSAURIOS alcanzaron un tamaño sorprendente. Los análisis de los anillos escleróticos, huesos en forma de rosquilla, revelan que *Ophthalmosaurus* tenía los mayores ojos, en relación con el tamaño corporal, que cualquier vertebrado adulto, actual o extinguido, y que *Temnodontosaurus* presentaba en términos absolutos los ojos más grandes. La silueta grisácea del fondo de la figura muestra el tamaño del anillo esclerótico de *Ophthalmosaurus*. La fotografía ofrece el anillo, en perfecto estado de conservación, de *Stenopterygius*.

Llegando al fondo

La invasión del mar abierto por los ictiosaurios significó no sólo un aprovechamiento en extensión de la superficie marina, sino también una exploración profunda del medio. Del examen del contenido estomacal de algunos ictiosaurios pisciformes se desprende que se alimentaban sobre todo de cefalópodos dibranquios. Las ballenas capturan los calamares de su dieta entre 100 y 1000 metros de profundidad, aunque en ocasiones descienden hasta los 3000 metros. Este amplio rango de profundidades resulta muy sorprendente, pues las fuentes alimentarias escasean por debajo de 200 metros. Además, cazar a esa profundidad no es fácil para las ballenas y otros animales buceadores de respiración aérea, ya que tienen que regresar a la superficie para volver a respirar. Ahora bien, la reducción del gasto de energía durante la natación constituye uno de los mejores medios para conservar el preciado oxígeno almacenado en el cuerpo. Por eso, los animales buceadores actuales presentan formas rígidas que menguan la resistencia de arrastre; y así lo harían los ictiosaurios pisciformes.

Aparte de la dieta y de la forma del cuerpo, observamos otros caracteres que confirman que algunos ictiosaurios pisciformes fueron buceadores profundos. La capacidad de inmersión de un buceador de respiración aérea depende en buena medida de su tamaño corporal: cuanto más pesado sea, más oxígeno podrá almacenar en músculos, sangre y ciertos órganos, y más bajo será el consumo de oxígeno por unidad de masa corporal. La evolución hacia un cuerpo grueso y rígido incrementó el volumen y la masa de los ictiosaurios pisciformes en relación con sus antepasados. Un ictiosaurio pisciforme debería haber pesado hasta seis veces más que un ictiosaurio lacertiforme de idéntica longitud. Los ictiosaurios pisciformes se alargaron más, aumentando su masa. Por cálculos basados en las capacidades de respiración de buceadores actuales (mamíferos y aves) suponemos que un animal del peso de *Ophthalmosaurus*, unos 950 kilo-

HECHO: Sus ojos fueron mayores que los de cualquier otro animal, vivo o extinguido



7. ESTE ISLOTE del nordeste de Japón albergaba dos esqueletos casi completos de *Utatsusaurus*, el ictiosaurio más antiguo.

gramos, podría contener su respiración al menos 20 minutos. En esa línea, y de acuerdo con una estimación prudente, *Ophthalmosaurus* podría fácilmente sumergirse hasta los 600 metros —quizás incluso 1500 metros— y volver a la superficie en dicho intervalo temporal.

El estudio de los huesos abona también la idea del buceo profundo en los ictiosaurios housepisciformes. Los huesos de las extremidades y de las costillas de los tetrápodos terrestres incluyen una capa externa densa que aumenta la resistencia necesaria para soportar el peso del animal en el suelo. Pero esa capa densa es pesada. Sin embargo los vertebrados acuáticos, que flotan, no necesitan tal resistencia adicional. De hecho, los huesos pesados (que ayudan muy poco en el almacenamiento de oxígeno) pueden impedir, en un buceador de profundidad, el retorno a la superficie. Un grupo de biólogos franceses ha demostrado que los mamíferos capaces de sumergirse a grandes profundidades han resuelto el problema con la adquisición de una capa esponjosa en la superficie de los huesos que los hace menos densos. Se trata de una capa que encontramos también en los huesos de los ictiosaurios housepisciformes, lo que implica que poseían un esqueleto aligerado.

Quizá la mejor prueba de los hábitos de inmersión en los ictiosaurios tardíos sean sus ojos inmensos, de 23 cm de diámetro en *Ophthalmosaurus*. Con relación al tamaño del cuerpo, poseía los mayores ojos conocidos del reino animal.

Semejante tamaño de los ojos sugiere una alta capacidad visual, más perfecta a medida que ascendemos en su árbol genealógico. Las estimaciones pertinentes se fundan en las dimensiones del anillo esclerótico, un hueso en rosquilla que rodea al ojo. (Las personas no poseemos ese anillo —se perdió en los mamíferos precursores—, pero otros vertebrados sí tienen huesos en los ojos.) En el caso de los ictiosaurios, el anillo servía probablemente para mantener la forma del órgano ante las fuerzas de corriente opuestas a su natación, cualquiera que fuera la profundidad.

El diámetro del anillo esclerótico permite calcular el mínimo número f del ojo, un índice utilizado en los objetivos de las cámaras para estimar el brillo relativo de un sistema óptico. Cuanto menor sea el número, más brillante la imagen y, por ende, se requerirá menos tiempo de exposición. Los objetivos de baja calidad poseen un valor de f/3,5 o superior; los de alta calidad presentan valores de apenas f/1,0. El valor para el ojo humano es de f/2,1, mientras que el número de un felino de hábitos nocturnos se cifra en torno a 0,9. Estas estimaciones sugieren que un felino podría ver a profundidades de 500 metros en la mayoría de los océanos. *Ophthalmosaurus* poseía también valor mínimo de f en torno a 0,9; ahora bien, con sus ojos inmensos podría probablemente superar la capacidad de un felino.

Al final se extinguieron

Muchos caracteres de los ictiosaurios —forma del cuerpo y columna vertebral, tamaño de los ojos, capacidad respiratoria, hábitat y dieta— sufrieron cambios en el curso de su evolución, aunque no es posible precisar ni el origen ni el efecto de los mismos. Lo que es seguro es que tales adaptaciones les facultaron para reinar durante 155 millones de años. Los nuevos fósiles de las formas más antiguas arrojan claridad sobre su feliz adaptación al medio, aunque no permiten desvelar por qué se extinguieron.

La pérdida de nicho pudo haber terminado con los ictiosaurios lacertiformes, cuyo estilo bastante ineficaz de natación ondulatoria les limitaba a los ambientes someros de las proximidades de la orilla. Un descenso del nivel del mar a gran escala podría haber causado su extinción junto con la de otros muchos organismos que medraban en aguas someras. Pero los ictiosaurios housepisciformes se desenvolverían en mar abierto, donde tendrían una mayor probabilidad de sobrevivir. Debido a que su hábitat nunca desapareció, tuvo que acontecer algo más que precipitase su extinción. El período de su eliminación coincide, a grandes rasgos, con la aparición de los tiburones modernos, pero hasta ahora nadie ha encontrado indicios de competencia entre ambos grupos.

La ciencia carece de elementos todavía para explicar la extinción de los ictiosaurios. Mientras tanto, los paleontólogos y otros investigadores continúan explorando su historia evolutiva. Queda mucho por aprender sobre la vida de criaturas tan fascinantes.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

VERTEBRATE PALEONTOLOGY AND EVOLUTION. R. L. Carroll. Freeman, San Francisco, 1987.

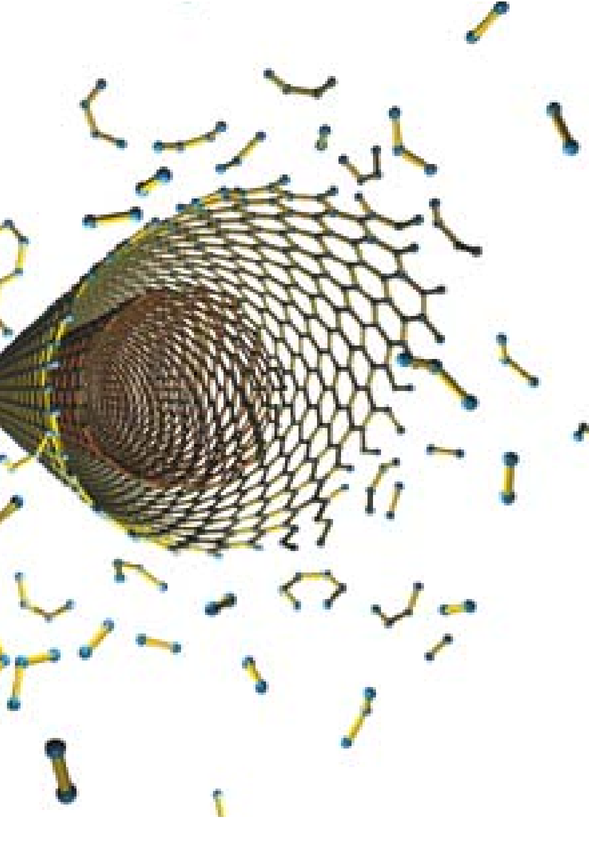
DINOSAURS, SPITFIRES, AND SEA DRAGONS. Christopher McGowan. Harvard University Press, 1991.

EEL-LIKE SWIMMING IN THE EARLIEST ICHTHYOSAURS. Ryosuke Motani, You Hailu y Christopher McGowan en *Nature*, vol. 382, págs. 347-348; 25 de julio, 1996.

ICHTHYOSAURIAN RELATIONSHIPS ILLUMINATED BY NEW PRIMITIVE SKELETONS FROM JAPAN. Ryosuke Motani, Nachio Minoura y Tatsuro Ando en *Nature*, vol. 393, págs. 255-257; 21 de mayo, 1998.

LARGE EYEBALLS IN DIVING ICHTHYOSAURS. Ryosuke Motani, Bruce M. Rothschild y William Wahl, Jr., en *Nature*, vol. 402, pág. 747; 16 de diciembre, 1999.

Página de Ryosuke Motani en la Red: www.ucmp.berkeley.edu/people/motani/ichthyo/



Introducción de los nanotubos en el dominio de la electrónica

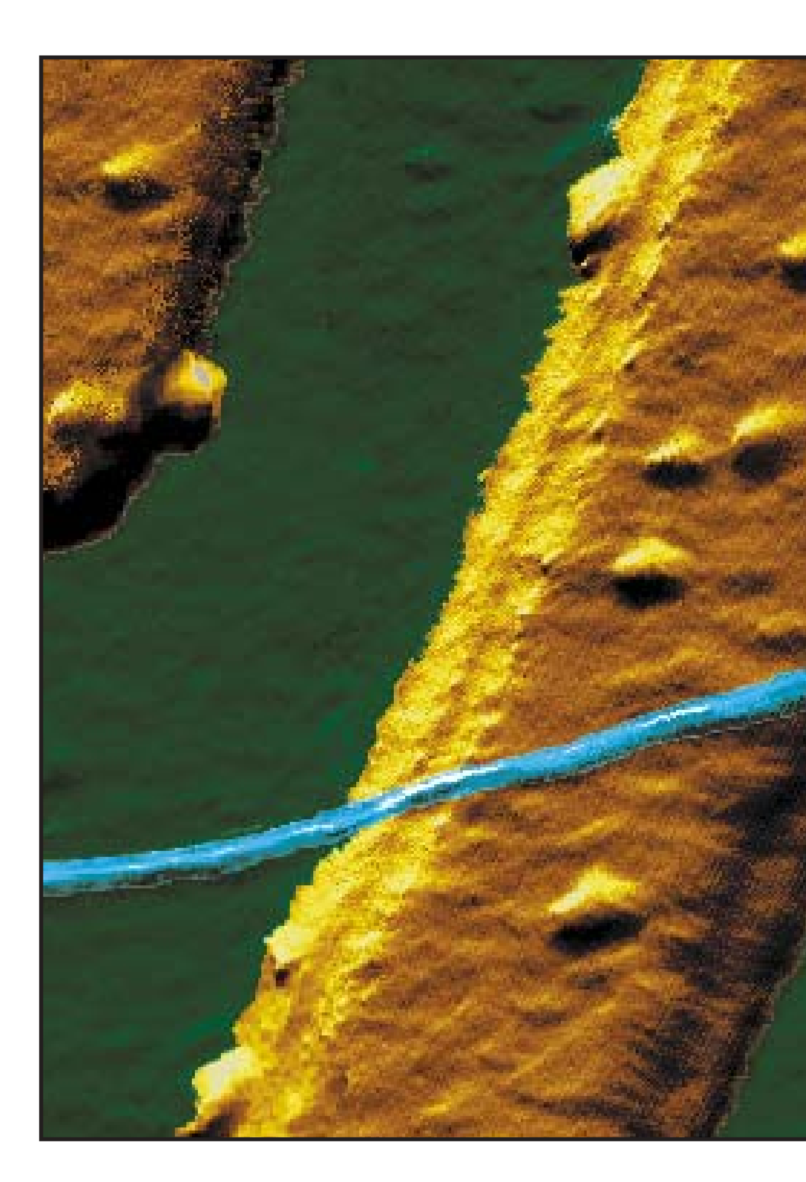
Más resistentes que el acero, estas macromoléculas fibriformes hallan un campo prometedor de aplicación en los dispositivos electrónicos

Philip G. Collins y Phaedon Avouris

Hará unos diez años Sumio Iijima, sentado ante su microscopio electrónico en el Laboratorio de Investigación Fundamental de NEC en Tsukuba, observaba unas extrañas fibras nanoscópicas depositadas sobre una mota de hollín. Constituidas por carbono, y de forma tan regular y simétrica como los cristales, estas macromoléculas de primorosa finura e impresionante longitud no tardaron en llamarse nanotubos. Desde entonces han sido objeto de intensa investigación básica.

Se ha dado un paso más. Ahora interesa también a la ingeniería. Muchas de las propiedades extraordinarias de los nanotubos —superlativa elasticidad, resistencia a la tracción y estabilidad térmica— han desatado la imaginación, que sueña con robots microscópicos, carrocerías de automóviles resistentes a las abolladuras y edificios a prueba de terremotos. Sin embargo, los primeros productos que incorporan nanotubos no lo hacen en razón de tales atributos, sino en virtud de sus propiedades eléctricas. Algunos automóviles de General Motors incluyen piezas de plástico a las que se añaden nanotubos; el material plástico se carga eléctricamente durante la fase de pintura para que ésta se adhiera mejor. Muy pronto saldrán al mercado dos productos de iluminación y presentación visual basados en nanotubos.

A largo plazo, las aplicaciones más valiosas sacarán mayor partido de las singulares propiedades electrónicas de los nanotubos. En principio, los nanotubos de carbono pueden desempeñar el mismo papel que cumple el silicio en los circuitos electrónicos, pero a escala molecular, donde el silicio y otros semiconductores al uso dejan de funcionar. Aunque la industria electrónica está llevando las dimensiones críticas de los transistores de los chips comerciales por debajo de 200 nanómetros (mil millonésimas de un metro) —unos 400 átomos de anchura— los ingenieros se enfrentan con grandes obstáculos para avanzar en la miniaturización. De aquí a 10 años, los materiales y los procesos sobre los que se ha basado la

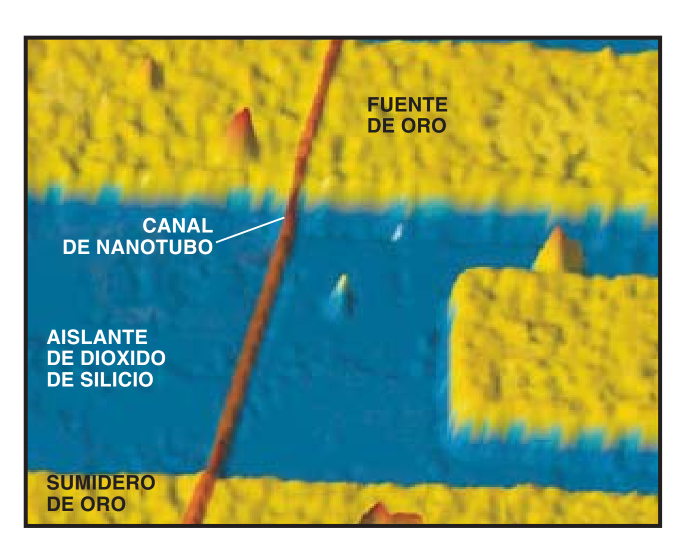


PHILIP G. COLLINS y PHAEDON AVOURIS trabajan en el Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM, interesados en las propiedades eléctricas de diversos tipos de nanotubos. Collins estudió física e ingeniería electrónica en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y la Universidad de California en Berkeley. Avouris, que dirige el grupo de nanociencia y nanotecnología de IBM, ha recibido el premio Feynman de nanotecnia molecular.

revolución informática comenzarán a alcanzar su límite físico infranqueable. Todavía hay enormes incentivos económicos para reducir aún más los dispositivos, porque la velocidad, la densidad y el rendimiento de los ingenios microelectrónicos aumentarán con la reducción del tamaño mínimo de los componentes. Los experimentos de los últimos años han dado esperanzas a los investigadores de que podrían fabricarse con nanotubos las conexiones y los dispositivos activos de un tamaño de diez nanómetros o inferior. Incorporados los nanotubos en circuitos electrónicos, éstos operarían más deprisa y sin consumir tanta energía como los actuales.

Los primeros nanotubos de carbono que observó Iijima en 1991 se denominaron tubos de paredes múltiples. Cada uno contenía cierto número de cilindros huecos de átomos de carbono anidados a la manera de muñecas rusas. Dos años después, Iijima y Donald Bethune, éste de IBM, crearon cada uno por su lado nanotubos de pared única, formados exclusivamente de una capa de átomos de carbono. Ambos tipos de tubos, fabricados de modo parecido, gozan de muchas propiedades similares; las más obvias, su longitud y estrechez, enormes. El modelo de pared única, de un nanómetro aproximado de diámetro, puede abarcar miles de nanómetros de longitud.

Lo que confiere a estos tubos su estabilidad notable es la intensidad con que se unen los átomos de carbono entre sí, propiedad que explica la dureza del diamante. En este mineral, los átomos de carbono se unen en un tetraedro de cuatro lados. Sin embargo, en los nanotubos los átomos se disponen en anillos hexagonales, la misma estructura que caracteriza al grafito; de



1. MICROCHIPS DEL FUTURO, que exigirán conexiones y transistores menores que los producidos por fotolitografía. Se están ensayando macromoléculas de carbono conductoras eléctricamente que se autoensamblan en tubos para operar como hilos ultrafinos (*izquierda*) y como canales en transistores experimentales de efecto de campo (*arriba*).

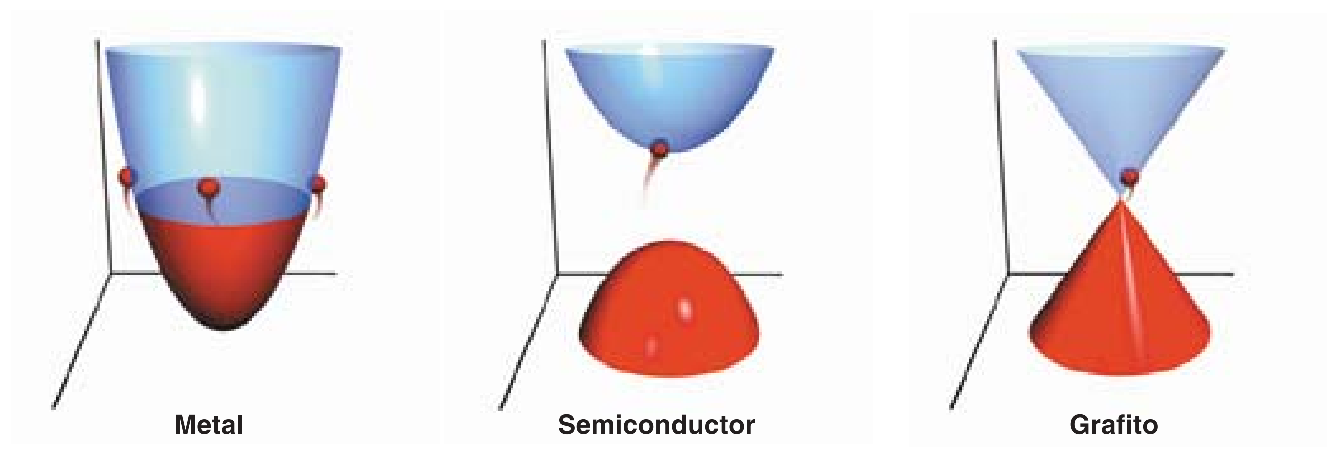
hecho un nanotubo parece una lámina (o varias láminas apiladas) de grafito enrollada en un cilindro sin costuras. No se sabe a ciencia cierta por qué los átomos se condensan en tubos, pero parece que pueden crecer añadiendo átomos a sus extremos, igual que una tejedora va agregando puntos a la manga de un jersey.

Tubos retorcidos

La composición y la geometría de los nanotubos de carbono engendran, con independencia de su formación, una complejidad electrónica única. Ello se debe, en parte, al tamaño, pues no olvidemos que la física cuántica manda a escala nanométrica. Pero el propio grafito constituye, de suyo, un material muy especial. Si la mayoría de los conductores eléctricos son o metales o semiconductores, el grafito pertenece al grupo restringido de los semimetales, instalado, en un delicado equilibrio, en la zona de transición entre aquéllos. Combinando las propiedades semimetálicas del grafito con las reglas cuánticas de niveles de energía y ondas electrónicas, los nanotubos de carbono surgen como conductores exóticos.

El comportamiento eléctrico de los nanotubos

Doble personalidad



LAS PROPIEDADES ELECTRICAS de un material dependen de la separación entre los estados de energía ocupados por electrones (*rojo*) y los estados adicionales de "conducción" vacíos y disponibles para que los electrones salten a ellos (*azul claro*). Los metales conducen electricidad por la gran cantidad de electrones que hay con fácil acceso a los estados de conducción adyacentes. En los semiconductores, los electrones necesitan un estímulo energético con luz o un campo eléctrico para superar el intervalo de separación hasta el primer estado de conducción disponible. El grafito es un semimetal apenas conductor, porque, sin tales estímulos externos, sólo unos pocos electrones pueden acceder al estrecho camino hacia un estado de conducción.



LOS NANOTUBOS RECTOS semejan un corte limpio de una lámina de grafito (*izquierda*) y enrollado en un tubo (*centro*). La geometría de los nanotubos limita los electrones a unas zonas específicas de estados de energía del grafito (*derecha*). A tenor del diámetro del tubo, una de estas rebanadas puede incluir el estrecho camino que une a los electrones con los estados de conducción. Débese a ese punto especial, o punto de Fermi, el que dos tercios de los nanotubos sean metálicos. Pero si el punto de Fermi no queda incluido en esas láminas, los nanotubos serán semiconductores.



NANOTUBOS RETORCIDOS, cortados en el grafito con cierto ángulo (*izquierda*). Recuerdan los postes indicadores de las barberías (*centro*). Las láminas de estados de energía permitidos para los electrones (*derecha*) se hallan cortadas de forma similar con un ángulo determinado; en virtud de ello, unos dos tercios de los tubos retorcidos no incluyen el punto de Fermi y son semiconductores.

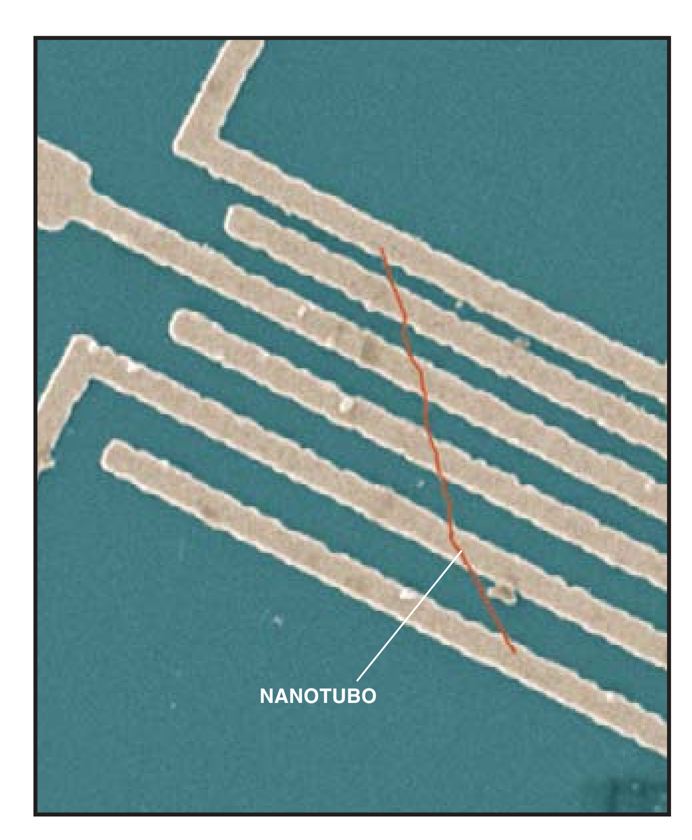
Impone cierta regla del mundo cuántico que los electrones se comporten como ondas y como partículas; las ondas electrónicas se amplifican o cancelan entre sí. Por consiguiente, un electrón que se distribuya alrededor de la circunferencia de un nanotubo puede autocancelarse por completo; y quedarán sólo los electrones con idéntica longitud de onda correcta. De todas las posibles longitudes de onda electrónicas, o estados cuánticos, que haya en una lámina plana de grafito, sólo un pequeño conjunto estará permitido cuando se enrolle para formar un nanotubo. El conjunto dependerá de la circunferencia del nanotubo, como también de si el nanotubo se retuerce a la manera de los anuncios luminosos de una barbería.

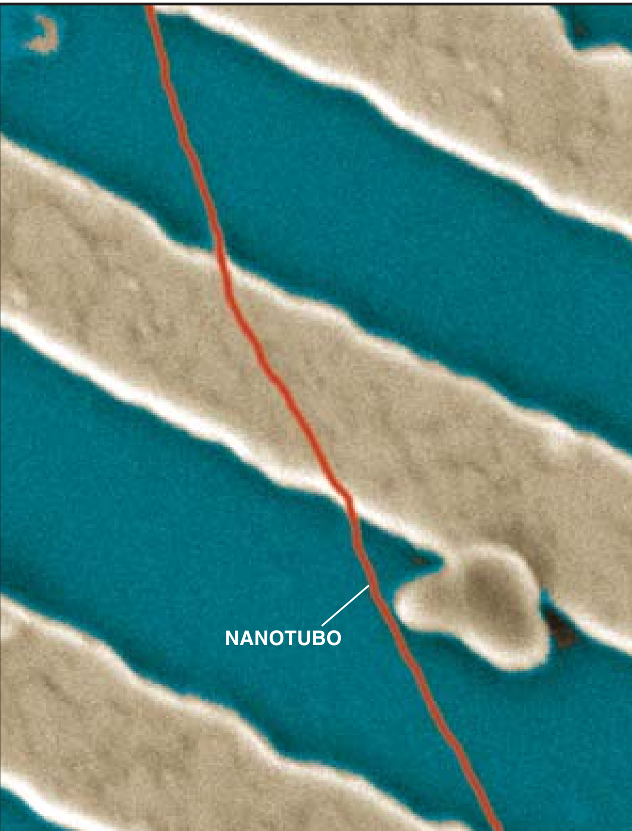
Al rebanar unos cuantos estados electrónicos de un metal o un semiconductor simples no se producen muchas sorpresas. Los semimetales, en cambio, son mucho más sensibles. Y, por tales, más interesantes los nanotubos de carbono. En una lámina de grafito, el punto de Fermi, cierto estado electrónico específico, confiere al grafito casi toda la conductividad que esgrime; en ningún otro estado gozan de libertad de movimiento los electrones. Sólo un tercio de todos los nanotubos de carbono combina el diámetro correcto y el correspondiente grado de torsión para incluir este punto de Fermi especial en su conjunto de estados permitidos. Estos nanotubos son auténticos nanofilamentos metálicos.

Los dos tercios restantes de nanotubos son semiconductores. Eso significa que necesitan, igual que el silicio, una aportación adicional de energía para dejar fluir la corriente. Una ráfaga de luz o un voltaje pueden llevar a los electrones desde los estados de valencia hasta los estados de conducción, donde se mueven con libertad. La cantidad de energía requerida depende de la separación entre ambos niveles, es decir, del intervalo de banda de un semiconductor. Gracias a esos intervalos los semiconductores resultan tan útiles en los circuitos. Merced a un amplio repertorio de materiales con diferentes intervalos de banda, los ingenieros han creado la rica batería actual de dispositivos electrónicos.

Los nanotubos de carbono no tienen todos el mismo intervalo de banda, porque para cada circunferencia existe un conjunto exclusivo de estados permitidos de valencia y de conducción. Los nanotubos de menor diámetro cuentan con muy pocos estados muy separados en energía. Al aumentar el diámetro de los nanotubos, se admiten cada vez más estados y la distancia entre ellos se acorta. Acontece, pues, que nanotubos de diferente tamaño pueden tener intervalos de banda nulos (cero, igual que un metal), de la magnitud del intervalo de banda del silicio o de casi cualquier valor entre ambos extremos. Ningún otro material conocido puede afinarse con semejante facilidad. Pero el crecimiento de los nanotubos produce todavía un montón de geometrías dispares. Por eso los investigadores se afanan en la búsqueda de mecanismos que nos garanticen tipos específicos de nanotubos.

Los nanotubos gruesos de pared múltiple pueden desarrollar incluso un comportamiento más complejo. Cada capa del tubo presenta una geometría algo distinta. Si pudiéramos diseñar a medida la composición de cada uno, se habría cumplido el sueño de fabricar tubos con pared múltiple que sean autoaislantes o que transporten señales múltiples al instante, como cables coaxiales nanoscópicos. Nuestro conocimiento y control del crecimiento de los nanotubos se hallan muy lejos de tales metas. No obstante, al incorporar nanotubos en circui-





2. AL SER FILAMENTOS ULTRAFINOS, los nanotubos de carbono podrían liberar espacio en los microchips para alojar más dispositivos, así como solucionar los problemas térmicos y de estabilidad. Con un diámetro ligeramente superior a un nanómetro, este nanotubo de una sola pared hace que las líneas trazadas por fotolitografía de última generación nos parezcan descomunales.

tos operativos hemos comenzado, por lo menos, a desentrañar sus propiedades básicas.

Nanocircuitos

Varios grupos de investigación, el nuestro incluido, han construido con éxito dispositivos electrónicos operativos a partir de nanotubos de carbono. Nuestros transistores de efecto de campo (FET) utilizan nanotubos semiconductores sencillos entre dos electrodos metálicos para crear un canal por donde circulan los electrones. La corriente que fluye a través del mismo puede activarse o desactivarse aplicando voltajes a un tercer electrodo inmediato. Los dispositivos basados en nanotubos funcionan a temperatura ambiente con características eléctricas notablemente similares a los dispositivos comerciales de silicio. Nosotros y otros grupos hemos encontrado que el electrodo de la puerta puede cambiar la conductividad del canal de nanotubo en un FET en un factor de un millón o más, equiparable a los FET de silicio. Debido a su minúsculo tamaño, sin embargo, el FET de nanotubos conmutaría sin errar y consumiendo mucha menos energía que un dispositivo de silicio. En teoría, un conmutador fabricado a nanoescala podría trabajar a velocidades cronométricas de un terahertz o más, mil veces más deprisa que los procesadores disponibles.





3. PRIMEROS DISPOSITIVOS ELECTRONICOS en incorporar nanotubos. Ofrecemos los elementos de iluminación de tubos de vacío (*izquierda*) y pantallas planas a todo color (*derecha*). Unos y otras aprovechan la capacidad de los nanotubos para emitir electrones a un voltaje bastante bajo sin fundirse, lo que se traduce en un uso más eficiente de la energía y una mayor duración.

Ante el amplio abanico de intervalos de banda y conductividades propios de los nanotubos, son múltiples las posibilidades que se abren para nanodispositivos adicionales. En nuestro laboratorio, y no sólo en él, al medir uniones de nanotubos metálicos y semiconductores, se ha observado que éstas se comportan como diodos, permitiendo que la electricidad circule en una sola dirección. En línea de principio, las combinaciones de nanotubos con diferentes intervalos de banda podrían convertirse en diodos emisores de luz y quizás en láseres nanoscópicos. Nada parece ahora impedir la creación de un nanocircuito dotado de conexiones, conmutadores y elementos de memoria realizados con nanotubos y otras moléculas. Con esta ingeniería molecular podrían obtenerse, por fin, no sólo versiones minúsculas de dispositivos al uso sino también otros nuevos que exploten los efectos cuánticos.

Hasta ahora, apresurémonos a decirlo, nuestros circuitos se han fabricado uno a uno y con sumo esfuerzo. Aunque cada grupo de investigación sigue su propio protocolo para fijar un nanotubo a los electrodos metálicos, en todos se recurre a la combinación de litografía tradicional para los electrodos con herramientas de mayor resolución, como microscopios de fuerza atómica, para colocar los nanotubos. Ni que decir tiene que nos queda un largo camino por recorrer desde la producción industrial, compleja, automatizada y paralela de microchips de silicio sobre los que se asienta la industria informática.

Antes de que podamos pensar en la fabricación de una estructura de circuitos fundada en nanotubos, habrá que encontrar métodos de desarrollo de nanotubos en posiciones, orientaciones, formas y tamaños específicos. En la Universidad de Stanford y en otras instituciones se ha demostrado que, colocando partículas de níquel, hierro o algún otro catalizador sobre un sustrato, se obtienen nanotubos que crecen donde se quiera. En Harvard se ha encontrado una forma de unir nanotubos con nanofilamentos de silicio, hilvanando conexiones a los circuitos fabricados por los medios habituales.

Hablamos de tímidos pasos. Con todo, suficientes para entrever la aplicación de nanotubos de carbono como transistores e hilos de interconexión en los circuitos de microchips. Estos filamentos, de unos 250 nanómetros de anchura, son metálicos. A los ingenieros les encantaría lograrlos mucho menores, para así integrar más dispositivos en la misma sección. Pero la miniaturización ulterior de los hilos metálicos ha de vencer dos dificultades imponentes. En primer lugar, no contamos todavía con un método eficaz para disipar el calor generado por los dispositivos; si apretaran más se provocaría un rápido sobrecalentamiento. En segundo lugar, al afilar los hilos metálicos la ráfaga de electrones que se mueve a través de ellos tiene suficiente fuerza para desplazar a los átomos metálicos y, en breve tiempo, los filamentos se degradarían, como fusibles fundidos.

En teoría los nanotubos podrían resolver ambos problemas. Predice ésta que los nanotubos de carbono conducen el calor a la manera casi del diamante o el zafiro; idea que parece confirmada en experimentos provisionales. Los nanotubos podrían, pues, refrigerar eficientemente series muy densas de dispositivos. Además, por ser los enlaces entre átomos de carbono mucho más fuertes que los de cualquier metal, los nanotubos pueden transportar enormes cantidades de corriente eléctrica; las medidas recientes muestran que un manojo de nanotubos de un centímetro cuadrado de sección transversal podría conducir unos mil millones de ampère. Estas corrientes tan altas vaporizarían el cobre o el oro.

Donde destacan los nanotubos

Los nanotubos de carbono muestran un segundo comportamiento electrónico de sumo interés para los ingenieros. En 1995 un grupo de la Universidad Rice observó que, cuando se colocaban erguidos y se cargaban eléctricamente, los nanotubos de carbono semejaban varillas o tubos de alumbrado, concentrando el campo eléctrico en sus puntas. Pero mientras una varilla de alumbrado conduce un arco a tierra, un nanotubo emite electrones desde su punta a una velocidad prodigiosa. Como son tan agudos, los nanotubos emiten elec-

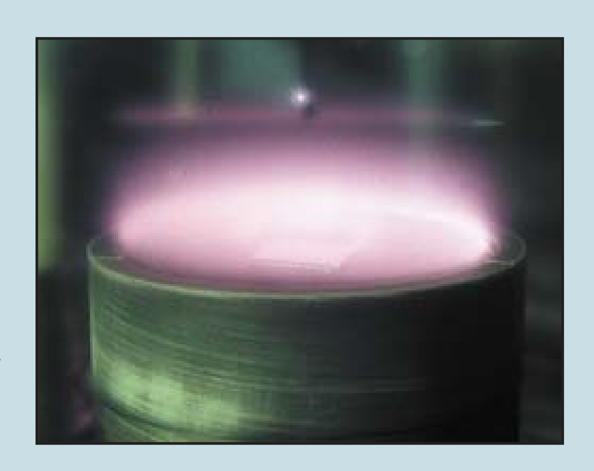
Tres formas de fabricar nanotubos

Volatilizar, hornear o bombardear

Aunque Sumio Iijima fue el primero en ver un nanotubo, otros se adelantaron en su fabricación. Sin saberlo, los hombres de Neandertal fabricarían cantidades minúsculas de nanotubos en las hogueras con que calentaban sus cuevas. Separados por el calor, los átomos de carbono se recombinan en el hollín; unos engendran glóbulos amorfos, otros unas esferas llamadas “buckybolas” y otros largas cápsulas cilíndricas, los “buckytubos” o nanotubos. La ciencia ha descubierto tres formas de fabricar hollín que contiene una proporción notable de nanotubos. Hasta ahora, sin embargo, los tres métodos sufren algunas limitaciones importantes: todos producen mezclas de nanotubos con una amplia gama de longitudes, muchos defectos y variedad de torsiones.

UNA GRAN CHISPA

En 1992 Thomas Ebbesen y Pullickel M. Ajayan, del Laboratorio de Investigación Fundamental de NEC en Tsukuba, publicaron el primer método de fabricación de cantidades macroscópicas de nanotubos. Consiste en conectar dos barras de grafito a una fuente de alimentación, separarlas unos milímetros y accionar un interruptor. Al saltar una chispa de 100 ampère de intensidad entre las barras, el carbono se evapora en un plasma caliente (*derecha*). Parte del mismo se vuelve a condensar en forma de nanotubos.



Rendimiento normal: Hasta un 30 por ciento en peso.
Ventajas: Las altas temperaturas y los catalizadores metálicos añadidos a las barras pueden producir nanotubos de pared única y múltiple con pocos defectos estructurales, si alguno.
Limitaciones: Los tubos tienden a ser cortos (50 micras o menos) y depositarse en formas y tamaños aleatorios.

UN GAS CALIENTE

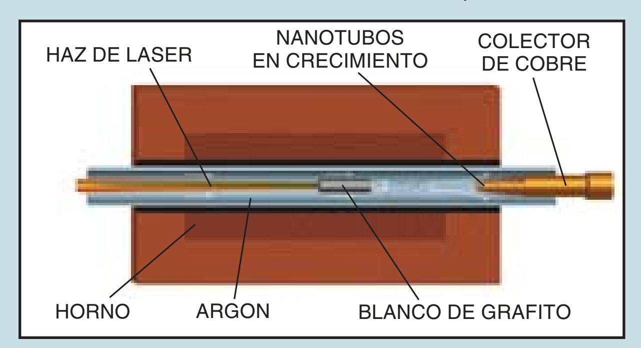


Morinubo Endo, de la Universidad de Shinshu en Nagano, introdujo, en la fabricación de nanotubos, el método de la deposición química en fase vapor (CVD). Se coloca un sustrato en un horno, se calienta a 600 grados centígrados y lentamente se añade metano, gas que contiene carbono. Al descomponerse el gas, libera átomos de carbono, que se pueden recombinar en forma de nanotubos.
Jie Liu y sus colegas de la Universidad de Duke han ideado un catalizador poroso que convierte casi todo el carbono en gas para creación de nanotubos. Imprimiendo diagramas de partículas de catalizador sobre el sustrato, Hongjie Dai y sus colegas de Stanford han controlado las posiciones de formación de los tubos y han venido trabajando para combinar este crecimiento controlado con la técnica estándar de silicio.

Rendimiento normal: de 20 a casi 100 por cien.
Ventajas: La técnica de CVD es el más sencillo de los tres métodos para su aplicación a escala industrial. Podría emplearse para fabricar nanotubos largos, necesarios en las fibras empleadas en materiales compuestos.
Limitaciones: Los nanotubos fabricados así suelen ser de pared múltiple y a veces están plagados de defectos. De ahí que los tubos tengan sólo una décima de la resistencia a la tracción respecto a los fabricados por la descarga de arco.

UN BOMBARDEO CON LASER

Se ocupaban Richard Smalley y su grupo, de la Universidad Rice, del bombardeo de un metal con pulsos intensos de láser para producir moléculas metálicas más extravagantes cuando les llegó la noticia del descubrimiento de los nanotubos. En su dispositivo sustituyeron el metal por barras de grafito. No tardaron en producir nanotubos de carbono utilizando pulsos de láser en lugar de electricidad para generar el gas caliente de carbono a partir del que se forman los nanotubos (*izquierda*). Ensayaron con varios catalizadores y lograron, por fin, las condiciones en que se producen cantidades prodigiosas de nanotubos de pared única.



Rendimiento normal: Hasta un 70 por ciento.
Ventajas: Produce nanotubos de pared única con una gama de diámetros que se puede controlar variando la temperatura de reacción.
Limitaciones: Este método necesita láseres muy caros.

—*P.G.C.* y *P.A.*

trones a voltajes menores que los electrodos fabricados con la mayoría de otros materiales, y sus vigorosos enlaces de carbono permiten que los nanotubos duren más sin ningún desperfecto.

Se había imaginado este comportamiento, llamado emisión de campo, para aprovecharlo en una técnica que sustituyera a los televisores y los monitores de ordenador, voluminosos y poco eficientes, con paneles planos de menor volumen y mayor rendimiento, sin merma del brillo. La idea, sin embargo, ha tropezado siempre con la fragilidad de los emisores de campo disponibles. Se confía en que los nanotubos puedan salvar ese es-



Otras aplicaciones de los nanotubos

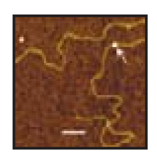
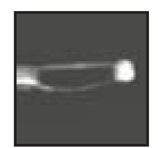
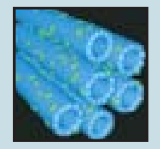
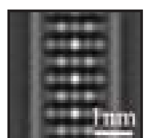
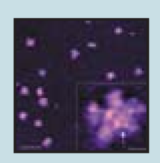
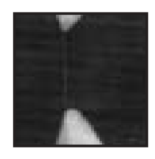
Más allá de la electrónica

Escala de viabilidad

0 = fantasía científica

2 = demostrado

4 = listo para comercializarse

	LA IDEA	OBSTACULOS	VIABILIDAD
 **Sondas químicas y genéticas** Hebra de ADN marcada	Un microscopio de fuerza atómica con punta de nanotubo puede localizar una hebra de ADN e identificar los marcadores químicos que revelan cuál de las variantes posibles de un gen presenta la hebra.	Se trata del único método inventado hasta ahora para ver la imagen de la química de una superficie, pero no se ha generalizado su empleo. Tan sólo se ha aplicado a fragmentos de ADN.	3
 **Memoria mecánica** RAM no volátil	Se ha ensayado una pantalla de nanotubos depositada sobre unos bloques de soporte en su función de dispositivo de memoria binaria, con voltajes que fuerzan el contacto entre tubos (estado "encendido") o su separación (estado "apagado").	No se midió la velocidad de conmutación del dispositivo. Sin embargo, el límite de velocidad para una memoria mecánica se halla en torno al megahertz, muy por debajo de los chips de memoria al uso.	2
 **Nanopinzas** Pinzas de cinco micras de longitud	Dos nanotubos, unidos a los electrodos en una barra de vidrio, se abren y cierran a través de un cambio de voltaje. Estas pinzas se emplean para aprisionar y mover objetos de 500 nanómetros de tamaño.	Aunque las pinzas pueden aprehender objetos que son grandes si los comparamos con su anchura, los nanotubos son tan adherentes, que la mayoría de los objetos no pueden liberarse. Por otro lado, hay formas más sencillas de mover estos objetos minúsculos.	2
 **Sensores supersensibles** El oxígeno se pega a los tubos	Los nanotubos semiconductores cambian su resistencia de un modo drástico cuando se exponen a álcalis, halógenos y otros gases a temperatura ambiente. De ahí la esperanza en lograr mejores sensores químicos.	Los nanotubos son sumamente sensibles a objetos tan dispares (oxígeno y agua incluidos), que podrían resultar incapaces de distinguir entre compuestos químicos o gases semejantes.	3
 **Almacenamiento de hidrógeno y iones** Atomos en un nucleo hueco	Los nanotubos podrían almacenar hidrógeno en su interior hueco y liberarlo gradualmente en pilas de combustible baratas y eficientes. Albergan también iones de litio, que podrían llevarnos a pilas de mayor duración.	Los informes más solventes hablan de una captación de hidrógeno del 6,5 por ciento, sin densidad suficiente, pues, para hacer que las pilas de combustible resulten económicas. El trabajo con los iones de litio está aún en fase preliminar.	1
 **Microscopio de barrido de mayor resolución** Anticuerpos IgM	Unidos a la punta de un microscopio de sonda de barrido, los nanotubos pueden amplificar la resolución lateral del instrumento en un factor de diez o más, permitiendo representaciones claras de las proteínas y otras macromoléculas.	Aunque disponible en comercio, las puntas se fabrican todavía una a una. Las puntas de nanotubos no mejoran la resolución vertical, pero permiten la formación de imágenes de pozos profundos en nanoestructuras que antes permanecían escondidas.	4
 **Materiales de máxima resistencia** Prueba de tensión mecánica en nanotubos	Incrustados en un material compuesto, los nanotubos disfrutan de enorme elasticidad y resistencia a la tracción. Podrían emplearse en coches que reboten en un accidente o edificios que oscilen en caso de terremoto en lugar de agrietarse.	Los nanotubos aún cuestan de 10 a 10.000 veces más que las fibras de carbono de los materiales compuestos. Además, son tan lisos, que se deslizan de la matriz y facilitan su degradación.	0

Recopilado por W. Wayt Gibbs, de la redacción

collo y despejar el camino para una alternativa a los tubos de rayos catódicos y los paneles de cristal líquido.

Resulta de una sencillez asombrosa fabricar, a partir de nanotubos, un emisor de campo de alta corriente. Basta con mezclarlos con plásticos en una pasta compuesta, se untan sobre un electrodo y se aplica un voltaje. Algunos nanotubos de la capa apuntarán, indefectiblemente, hacia el electrodo opuesto y emitirán electrones. En el Instituto de Tecnología de Georgia, Stanford y otras instituciones se han encontrado ya métodos para el desarrollo de grupos de nanotubos erguidos en pequeñas rejillas ordenadas. Con una óptima densidad, estos grupos pueden emitir más de un ampère por centímetro cuadrado, suficiente para iluminar los fósforos en una pantalla y capaz de controlar relés de microondas y conmutadores de alta frecuencia en estaciones de telefonía móvil.

Sabemos de dos compañías empeñadas en la fabricación de bienes que utilizan nanotubos de carbono como emisores de campo. La japonesa Ise Electronics ha ensayado compuestos de nanotubos para fabricar prototipos de bombillas de tubos de vacío en seis colores, cuyo brillo dobla el de las bombillas tradicionales, tienen una mayor duración y decuplican el ahorro energético. El primer prototipo ha funcionado bien durante más de 10.000 horas y aún no ha fallado. Los ingenieros de Samsung en Seúl esparcen nanotubos en una película delgada sobre la electrónica de control y luego colocan encima vidrio revestido de fósforo para fabricar un prototipo de pantalla plana. Cuando realizaron la demostración del panel, en 1999, eran optimistas respecto a que la compañía pudiese tener el dispositivo —que brillará como un tubo de rayos catódicos y consumirá una décima parte de potencia— listo para su producción en el año en curso.

El tercer ámbito en el que los nanotubos de carbono muestran propiedades electrónicas especiales es el de escala muy pequeña, allí donde revisten interés los efectos que dependen del tamaño. A ciertas escalas, nuestras ideas de filamentos con resistencia fracasan de forma estrepitosa y deben sustituirse por modelos de mecánica cuántica. Se trata de un reino, inalcanzable para la técnica de silicio, que puede ofrecer nuevos descubrimientos sorprendentes; exigirá también bastante mayor investigación que en el caso de los nanocircuitos o los dispositivos de emisión de campo con nanotubos.

Entre los temas debatidos a resolver citemos el concerniente al movimiento preciso de los electrones a lo largo de un nanotubo. Según parece, en los nanotubos sin defectos los electrones viajan "balísticamente", sin ninguna dispersión, que es el agente causal de la resistencia de los filamentos metálicos. Cuando los electrones pueden viajar largas distancias sin dispersión, mantienen sus estados cuánticos, fenómeno clave para observar la interferencia entre ondas electrónicas. Además, la falta de dispersión ayudaría a entender por qué los nanotubos conservan su estado de espín electrónico cuando se desplazan. (El espín electrónico es una propiedad cuántica.) Apoyados en ese insólito comportamiento algunos se proponen construir dispositivos "espín trónicos" que se activen o desactiven en respuesta al espín electrónico, en lugar de hacerlo en respuesta a su carga (lo que ocurre en los dispositivos electrónicos).

Asimismo, puede controlarse con exquisita precisión el flujo de electrones en el tamaño mínimo de un nanotubo. Se acaba de demostrar en

Propiedades de los nanotubos de carbono

Llegando hasta los extremos

PROPIEDAD	NANOTUBOS DE PARED UNICA	EN COMPARACION
Tamaño	0,6 a 1,8 nanómetros de diámetro	La litografía por haz electrónico puede crear líneas de 50 nm de anchura y un espesor de unos pocos nm
Densidad	1,33 a 1,40 gramos por centímetro cúbico	El aluminio tiene una densidad de 2,7 g/cm^3
Resistencia a la tracción	45×10^9 pascal	Las aleaciones de acero de alta resistencia se rompen aproximadamente a 2×10^9 pascal
Elasticidad	Se pueden doblar hasta grandes ángulos y recuperarse sin sufrir daño	Los metales y las fibras de carbono se rompen en las fronteras de grano
Capacidad de transporte de corriente	Estimada en 10^9 ampère por centímetro cuadrado	Los hilos de cobre se funden a un millón A/cm^2 aproximadamente
Emisión de campo	Pueden activar fósforos a un voltaje de uno a tres volt si media una micra entre electrodos	Las puntas de molibdeno necesitan campos de 50 a 100 V/µm y tienen períodos de vida muy limitados
Transmisión de calor	Se predice que tienen un valor de 6000 watt por metro por kelvin a temperatura ambiente	El diamante casi puro transmite 3320 W/m·k
Estabilidad térmica	Estables hasta 2800 grados centígrados en vacío, 750 grados centígrados en aire	Los filamentos metálicos en microchips se funden de 600 a 1000 grados centígrados

los nanotubos el bloqueo de Coulomb, fenómeno en virtud del cual los electrones repelen cualquier pretensión de insertar simultáneamente más de un electrón en dichas estructuras. El fenómeno podría facilitar la construcción de transistores de un solo electrón, lo último en electrónica sensible. Pero las propias mediciones abren interrogantes que la física actual no sabe despejar. Confinados en estos finísimos filamentos unidimensionales, los electrones se comportan de forma tan extraña que apenas si parecen tales partículas.

Con el tiempo, pues, los nanotubos podrían ofrecer no sólo versiones menores y mejores de los dispositivos existentes, sino también algunos de nuevo cuño que dependerían por entero de los efectos cuánticos. Queda mucho, cierto, por conocer a propósito de dichas propiedades de los nanotubos antes de poder sacarles partido. Sobre la mesa yacen ya algunas cuestiones. Sabemos que todos los dispositivos moleculares, incluidos los nanotubos, son muy sensibles al ruido producido por fluctuaciones eléctricas, térmicas y químicas. Hemos comprobado que, cuando se fija un contaminante (oxígeno, por ejemplo) a un nanotubo, se resienten sus propiedades eléctricas. Eso, que puede ser útil para crear detectores químicos delicadamente sensibles, constituye un obstáculo para la fabricación de circuitos de una sola molécula. En el control de la contaminación reside el principal reto cuando una sola molécula puede marcar la diferencia.

Pese a todo, con tantas vías de desarrollo en marcha, parece claro que ya no se trata de saber si los nanotubos se convertirán en componentes útiles de los ingenios electrónicos del futuro, sino simplemente cómo y cuándo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CARBON NANOTUBES AS MOLECULAR QUANTUM WIRES, Cees Dekker en *Physics Today*, volumen 52, número 5, páginas 22-28; mayo 1999.

CARBON NANOTUBES. Sección especial en *Physics World*, volumen 13, n.º 6, páginas 29-53; junio 2000.

CARBON NANOTUBES. Mildred S. Dresselhaus, Gene Dresselhaus y Phaedon Avouris. Springer-Verlag, 2000.



Con el nacimiento de Noé, un gaúr macho, se traspasó la barrera específica en la clonación. Parido por una humilde vaca, el becerro nacido el 8 de enero, y muerto 48 horas más tarde, pertenecía a una especie distinta, un grupo de animales de gran tamaño parecidos al buey cuyo número escasea en sus lugares de origen: India, Indochina y el sudeste de Asia. Estos bovinos salvajes, víctimas de la caza deportiva durante generaciones, vienen a pesar alrededor de una tonelada. En los últimos años han sufrido, además, una intensa reducción del medio donde habitan, los bosques, las junglas de bambú y las praderas. Se calcula que sólo unos 36.000 ejemplares permanecen en estado salvaje. En el Libro Rojo de la Unión Mundial para la Conservación de la Naturaleza-IUCN, el gaúr se numera entre las especies amenazadas. El comercio de esos animales o de sus productos —cuernos, pieles o cascos— está prohibido por la Convención sobre Comercio Internacional de Especies Amenazadas (CITES).

Tras Noé se espera que otras especies suban con más suerte la rampa del arca. Hay planes en marcha para clonar el antílope africano Bongo, el tigre de Sumatra y el panda gigante. Se investiga incluso en la posibilidad de devolver a la vida especies extintas; la más inmediata, quizás, el bucardo (subespecie de cabra montés) de España. El último bucardo, una hembra, murió a principios del año 2000, aplastada por un árbol. Pero un equipo de científicos españoles habían conservado algunas de sus células.

Los avances en la clonación ofrecen una vía para preservar y propagar especies amenazadas que se reproducen con dificultad en los zoos, hasta que puedan reintroducirse en su medio natural, una vez restablecido. Con todo, la fuerza principal de la clonación reside en la posibilidad de aumentar la diversidad genética al introducir nuevos genes en el acervo de una especie de la que quedan pocos animales. La mayoría de los zoos no están preparados para recoger y congelar semen. Además, cuesta obtener ovocitos, que se dañan con la congelación. Pero a través de la clonación de animales cuyas células somáticas se han conservado, podemos mantener vivos los genes de un individuo, preservando (y en algunos casos aumentando) la diversidad genética del conjunto de una población de dicha especie.

Sin embargo, algunos biólogos se han mostrado remisos a la hora de reconocer los beneficios de las estrategias básicas de la reproducción asistida, tales como la fecundación *in vitro*, y han planteado sus dudas sobre la clonación. Aunque estamos de acuerdo en que deben hacerse todos los esfuerzos posibles para preservar los espacios salvajes con el fin de mantener la rica biodiversidad del planeta, ya se ha perdido esa batalla en algunos casos o no se ha avanzado un milímetro. La técnica de la clonación, aunque no es la panacea, ofrece la oportunidad de salvar especies que contribuyen a esa diversidad.

Pero un clon necesita una madre, y muy pocos conservacionistas abogarían por capturar hembras salvajes de especies amenazadas para ese propósito o por someter a una recluida en un zoo a la incomodidad de la reproducción asistida o de la maternidad de alquiler. Dicho de otra manera, para clonar especies amenazadas hemos de resolver antes el problema de cómo obtener células de dos especies diferentes que nos permitan conseguir el clon de una de ellas.

¿Qué es clonar?

Un proceso de apariencia engañosamente simple. Con una aguja atravesamos la capa protectora, o zona pelúcida, que rodea al ovocito, célula



Clonación del Arca de Noé

Se confía en la biotecnología para evitar que algunas especies en peligro de extinción desaparezcan del planeta

Robert P. Lanza, Betsy L. Dresser y Philip Damiani

ROBERT P. LANZA, BETSY L. DRESSER Y PHILIP DAMIANI comparten un mismo interés por la biología de la reproducción. Lanza es vicepresidente de Advanced Cell Technology (ACT) en Worcester. El mismo cargo desempeña Dresser en el Instituto Audubon de Nueva Orleans; director del Centro para la Investigación de Especies Amenazadas. Damiani, investigador de ACT, es también miembro del comité de crioconservación de la Sociedad Internacional de Transferencia de Embriones.

que horas antes se encontraba en un ovario vivo. Con un hábil movimiento, el técnico se sirve de ella para aspirar el núcleo del ovocito —donde se halla la mayor parte del material genético de una célula— dejando sólo una bolsa de gel, o citoplasma. A continuación, utiliza una segunda aguja para inyectar otra célula completa bajo la capa externa del ovocito. Se completa la clonación con una descarga eléctrica: el pulso eléctrico fusiona la célula introducida y el ovocito. Comienza, a continuación, la división celular. En pocos días, se convertirá en una masa de células de tamaño suficiente para su implantación en el útero de una hembra, previamente tratada con hormonas, que hará de madre de alquiler. En cuestión de unos meses, esa madre de alquiler parirá un clon.

En la práctica, sin embargo, esta técnica de transferencia nuclear, así se llama, no es tan simple. Para crear a Noé, en nuestro laboratorio de Advanced Cell Technology (ACT), fusionamos células de la piel, extraídas de un macho de gaúr, con 692 ovocitos de vaca enucleados. De esos 692 embriones clonados, sólo 81 crecieron *in vitro* hasta el estadio de blastocisto, estructura globulosa de un centenar de células cuyo desarrollo posibilita su implantación y gestación. Terminamos transfiriendo 42 blastocistos en 32 vacas, pero sólo ocho mantuvieron la gestación. De dos de éstas, retiramos los embriones para realizar determinados análisis científicos; otras cuatro sufrieron abortos espontáneos en el segundo o tercer mes de una gestación normal de nueve meses. La séptima vaca tuvo un inesperado y tardío aborto espontáneo el sexto mes.

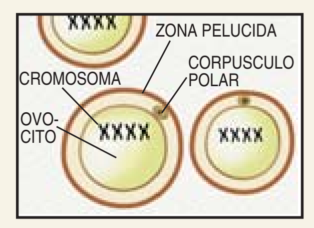
Las estadísticas sobre eficiencia de la clonación reflejan la falta de madurez de la técnica, un arte todavía, más que una ciencia, en particular cuando implica el trasplante de un embrión a otra especie. Se han conseguido los mayores éxitos en la clonación de bóvidos domésticos implantados en vacas de su misma especie. Pero incluso en este caso hemos tenido que trabajar duro para cosechar contados éxitos. Por cada 100 ovocitos de vaca que se fusionan con células adultas bovinas, llegan al estadio de blastocisto entre 15 y 20. Y aproximadamente un 10 % de éstos —uno o dos— darán lugar a nacidos vivos.

Los números reflejan las dificultades del proceso de transferencia nuclear en sí mismo, en cuyo estudio trabajamos actualmente. Revelan también el carácter un tanto errático de la técnica de reproducción asistida.

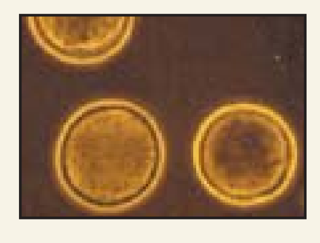
Todo ello nos induce a suponer que las primeras especies amenazadas en ser clonadas serán aquellas cuya biología de la reproducción se haya investigado con detenimiento. Numerosos zoos y sociedades conservacionistas —incluido el Instituto Audubon para la investigación de especies en peligro (AICRES) de Nueva Orleans, dirigido por uno de nosotros (Dresser)— han estudiado la biología de la reproducción de varias especies en peligro, con éxitos notables. En noviembre de 1999, por ejemplo, el grupo de Dresser notificaba el primer trasplante de un embrión congelado de una especie amenazada a otra especie, que dio lugar al nacimiento de un animal vivo. Se trataba de un gatito salvaje africano parido por una gata doméstica común.

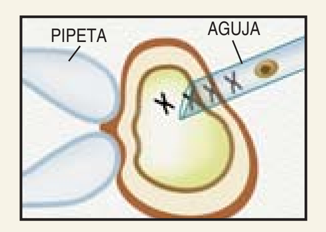
Además del gato salvaje africano y el gaúr, se han realizado transferencias de embriones interespecíficas en otros cinco casos: un gato del desierto indio a un gato doméstico, un antílope bongo a un antílope eland, un muflón a una oveja doméstica, un raro ciervo rojo a un ciervo común y una cabra montés a una cabra doméstica.

EL PROCESO DE TRANSFERENCIA NUCLEAR (CLONACION)

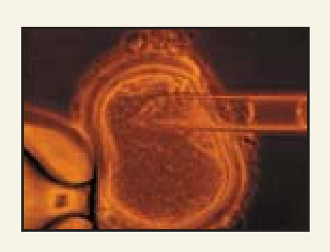


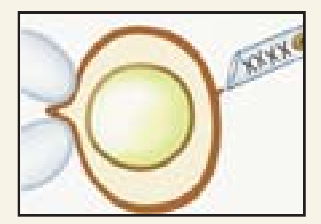
Los ovocitos receptores maduran en una placa de cultivo. Cada uno de ellos produce un corpúsculo polar, una célula residual.



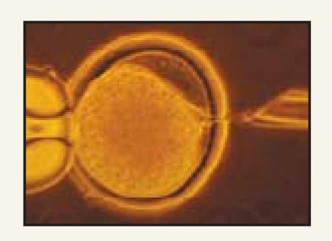


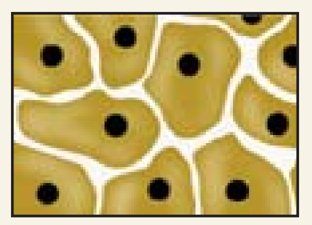
Con una aguja se aspiran los corpúsculos polares y cromosomas de cada ovocito. Una pipeta mantiene inmóvil al ovocito.



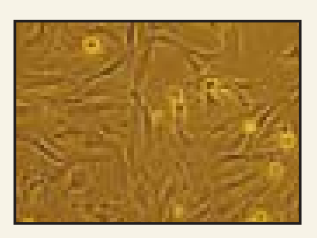


Una vez aspirados los cromosomas y el corpúsculo polar, sólo queda en el interior de la zona pelúcida el citoplasma.





Del animal que ha de ser clonado se aíslan fibroblastos, unas células de la piel, cuya multiplicación se induce en placas de cultivo.



Todos terminaron con el nacimiento de animales vivos. Esperamos que los estudios en felinos preparen el terreno para clonar el guepardo, especie de la que sólo quedan unos 12.000 ejemplares en Africa meridional. El comportamiento de cortejo prolongado del guepardo precisa un amplio territorio, lo que explicaría por qué se reproduce mal en los zoos y constituye una razón más para temer su extinción al reducirse su hábitat.

Panda-mónium

Aunque no se ha estudiado todavía a fondo la posibilidad de transferencia interespecífica de embriones de uno de los mejores candidatos para la clonación de especies amenazadas —el panda gigante—, sí se ha beneficiado éste de otras técnicas de reproducción asistida. Tras las famosas manipulaciones eróticas de la pareja de pandas gigantes, Ling-Ling y Hsing-Hsing muertos en el Zoo Nacional de Washington, el zoo de San Diego recurrió a la inseminación artificial para conseguir que Bai Yun y Shi Shi tuviesen descendencia. La cría de la pareja, Hua Mei, nació en agosto de 1999.

El panda gigante es una de las especies amenazadas más emblemáticas. Su imagen aparece en el logotipo de la Fundación para la Vida Salvaje en el Mundo (WWF). Hace 20 años, momento en el que se realizó el último censo de esta especie, no llegaba al millar el número de ejemplares que vivían en los bosques de bambú de las montañas del sudoeste de China, su asentamiento natural. Se habla ahora de una ligera recuperación en algunas zonas. La WWF tiene previsto terminar a mediados del año 2002 un nuevo censo de la población de osos panda para conocer con mayor exactitud su número.

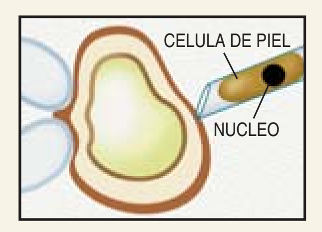
En ACT nos proponemos, en colaboración con el gobierno de China, clonar un panda gigante. Los expertos chinos han avanzado ya algunos pasos en ese camino. En agosto de 1999, el equipo de Dayuan Chen daba cuenta de la fusión de células de músculo esquelético, de útero y de glándula mamaria del panda con ovocitos de conejo; a continuación, cultivaron las células clonadas que se desarrollaron, en condiciones de laboratorio, hasta el estadio de blastocisto.

Ni que decir tiene que una coneja es demasiado pequeña para servir de madre de alquiler de un panda gigante. Por eso ACT y el gobierno chino piensan utilizar hembras de oso negro americano; se recurrirá a ovocitos extraídos de sus ovarios y células que se congelaron de Hsing-Hsing o de Ling-Ling para generar embriones clonados de panda gigante que puedan implantarse en hembras de oso negro que vivan en zoos. Un grupo de investigación, entre cuyos componentes se encuentran veterinarios del Bear Country U.S.A. en Rapid City, ha demostrado que los osos negros pueden parir oseznos provenientes de embriones transferidos. Dicho grupo dio a conocer el nacimiento de un osezno proveniente de un embrión que había sido transferido de una osa negra a otra.

En AICRES esperan aprovechar el éxito que uno de nosotros (Dresser) cosechó con el antílope bongo en el zoo de Cincinnati. En 1984 Dresser, y el equipo encabezado por Charles Earle Pope, entonces en la Universidad de Alabama en Birmingham y ahora en AICRES, anunciaron el nacimiento de una cría de antílope bongo de una hembra de antílope eland a la que le habían transferido embriones muy jóvenes de una hembra de bongo gestante.

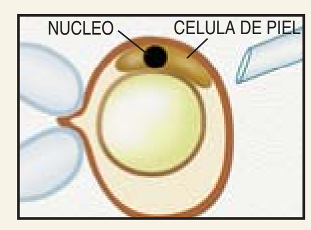
La mayoría de los individuos de la subespecie de bongo de montaña —un antílope de estatura mediana con rayas blancas verticales— viven en cautividad. Según la Unión para la Conservación de la Naturaleza (UICN), el bongo de montaña se encuentra "en peligro de extinción"; quedan sólo unos 50 ejemplares libres en una pequeña región de Kenia, cifra que contrasta con los 550 que viven en cautividad, según el Registro Internacional de Bongos de montaña. La subespecie de bongo de las llanuras se encuentra en mejor situación. Para la UICN se trata de una especie "al borde de la amenaza", con una población de varios miles de individuos distribuidos por el centro y el oeste de Africa.

Una agrupación de organizaciones conservacionistas de EE.UU. y Kenia proyecta trasladar bongos de mon-



Se aspira con la aguja una célula completa de piel y se pincha la zona pelúcida.



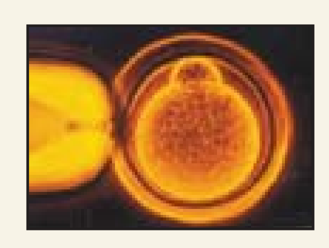


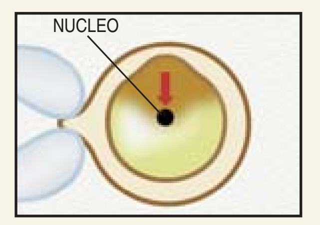
La célula de piel se inyecta bajo la zona pelúcida, donde permanece separada del citoplasma del ovocito.



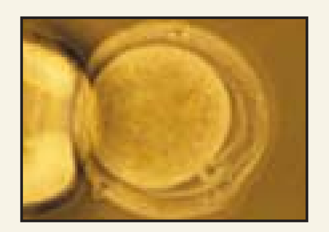


Cada ovocito inyectado se expone a un shock eléctrico que fusiona la célula de piel con el citoplasma del ovocito.





El núcleo de la célula de piel, con sus genes, penetra en el citoplasma del ovocito. En pocas horas, comienza a dividirse la célula fusionada.



SOBRE PERROS Y GATOS

Hasta la fecha se ha conseguido la clonación de ovejas, vacas, cabras y ratones de laboratorio. Ante semejante elenco, podría pensarse que la clonación de un perro o un gato comunes sería coser y cantar. Nada más lejos de la verdad. Se han creado embriones clonados de gato e implantado en gatas, pero no se ha logrado todavía una gestación a término. Mayores problemas presentan los perros.

Podríamos, sin embargo, apuntarnos un éxito muy pronto. En Advanced Cell Technology (ACT), hemos iniciado un programa de investigación que aplica la clonación para obtener animales de compañía y animales útiles (perros lazarillos para los ciegos, perros para sordos, perros para búsqueda y rescate y animales empleados como terapia social). El Instituto Audubon y la Universidad estatal de Luisiana han establecido la empresa "Lazaron Bio Technologies" para la clonación de perros y gatos de compañía.

Muchas personas están interesadas en clonar su animal de compañía favorito muerto, con la esperanza de sustituirlo por otro con características similares de comportamiento. Se cree que la conducta viene determinada, en buena medida, por la genética. Aunque podría aducirse que no faltan perros y gatos en el mundo que necesitan un hogar, se sigue recurriendo a los métodos tradicionales de cruce en busca del animal deseado. La clonación puede ofrecer una alternativa más eficiente. Lo que reviste particular interés si hablamos de especímenes que prestan notables servicios. Los perros lazarillo, por ejemplo, son esterilizados a una edad temprana para que puedan concentrarse mejor durante su entrenamiento, caro y riguroso.





LOS ANIMALES de servicio y de compañía podrían ser clonados en breve. En una película reciente, *El Sexto Día*, los dueños acuden a una empresa llamada "RePet" para copiar sus animales.

La experiencia adquirida en la clonación de animales de compañía clonados podría facilitar la labor en su aplicación a especies amenazadas; de modo particular, felinos y cánidos al borde de la extinción.

ACT y otras compañías ofrecen kits de clonación de animales de compañía que los veterinarios pueden usar para conservar muestras de un animal de cara a una futura clonación. El protocolo contiene los materiales necesarios para extraer una muestra de piel y enviarla al laboratorio. A partir del tejido se establece un cultivo de células puras en división; esa línea celular será la fuente de células donadoras para la clonación. ACT extrae ovocitos con ese fin a partir del aparato genital de animales castrados por los veterinarios: se separan los ovarios y se puncionan los folículos para obtener los ovocitos. A continuación, se colocan los ovocitos en un medio de maduración especial que contiene hormonas, proteínas y nutrientes. Una vez maduros, los ovocitos están listos para la transferencia nuclear.

Nos hemos centrado en el gato doméstico por la sencilla razón de que se domina bastante bien sus mecanismos fisiológicos de reproducción. Disponemos ya de embriones clonados. Pero los perros son otra historia, dotados de una fisiología singular entre los mamíferos. Las perras ovulan un ovocito cuyo período de maduración es muy largo. Eso significa que se precisa un sistema distinto de maduración del que se ha empleado en el gato y que, por tanto, el número de ovocitos para trabajar es menor.

—R.P.L., B.L.D. y P.D.

taña nacidos en cautividad a dos lugares de Kenia. Y, como una nueva forma de reintroducir una especie, AICRES está trabajando en Kenia para transferir embriones congelados de bongo a hembras de antílopes eland. La clonación puede prestar su apoyo a todas esas medidas y producir, a buen seguro, más bongos para su reintroducción.

Pero, ¿qué hay de los animales que ya se han extinguido? Las posibilidades de clonar dinosaurios o mamuts son escasas, por no decir nulas. No se han conservado tejidos celulares ni, por tanto, ADN. En 1999, se desenterró lo que se creía podía ser un mamut bien preservado, pero las congelaciones y descongelaciones sufridas a lo largo de los siglos provocaron "agujeros" en el ADN del cadáver, y los biólogos moleculares no han encontrado todavía una forma factible de rellenar esos huecos del material genético.

Un problema similar grava los esfuerzos realizados por científicos australianos para clonar el tilacino o tigre de Tasmania, un marsupial parecido al lobo cuyo último ejemplar murió en los años treinta. En el Museo Australiano de Sydney se está intentando clonar las células de un cachorro de tigre de Tasmania conservado en alcohol desde 1866, pero el ADN se halla en una condición tan pésima, que temen que se deban reconstruir todos los cromosomas del animal.

El bucardo, recientemente extinguido, parece un objetivo más adecuado para clonar una especie desaparecida. ACT ha iniciado una colaboración con el Gobierno de Aragón, coordinada por José Folch, del Servicio de Investigación Agroalimentaria, destinada a la clonación del bucardo. En este centro se congelaron tejidos del último bucardo vivo. Aunque desde 1989 el equipo de Folch venía trabajando en su protección, la especie se ha extinguido debido a una caza abusiva y a la dureza del entorno en el que sobrevivían los últimos ejemplares. En 1991, este equipo transfirió embriones de una especie de cabra montés emparentada con el bucardo a cabras domésticas, obteniendo el nacimiento de cabritos vivos.

Mas, aun cuando se logre la transferencia nuclear interespecífica del bucardo, obtendremos clones de la hembra sólo, porque el tejido procede de un único animal, una hem-

EL DECLIVE DEL BUCARDO

El último ejemplar de bucardo (*Capra pyrenaica pyrenaica*), una hembra de 12 años, murió aplastada por un árbol el 6 de enero de 2000 en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Se extinguía, así, la estirpe pirenaica de cabra montés.

La desaparición del bucardo ha seguido un proceso lento. Los restos fósiles muestran que, hasta la Edad Media, el bucardo medraba en gran parte de los Pirineos. Pero con la llegada de las armas de fuego se aceleró su declive. En el siglo XIX constituía uno de los trofeos más escasos de Europa. Conocidos cazadores, ingleses y franceses sobre todo, acudían a los últimos reductos de la Maladeta, Ordesa y Monte Perdido para abatir alguno de los rarísimos ejemplares supervivientes. Estos cazadores foráneos se sumaban a la presión venatoria de la población local, que se alimentaba de su carne.

Una de las primeras medidas dirigidas hacia la conservación del bucardo fue la prohibición de su caza en 1913 y la declaración de Parque Nacional en 1918 de gran parte de los territorios que habitaba. A partir de los años sesenta, se tomaron medidas adicionales de protección, como aportar alimentación suplementaria en invierno, que no pudieron frenar la caída progresiva de la población. En 1987 se observó por última vez un cabrito de bucardo y en 1990 se vio el postrer ejemplar macho de esta subespecie.

En 1989, el gobierno de Aragón puso en marcha un plan para preservar los bucardos vivos e intentar recuperar la especie. Se hizo un estudio exhaustivo de los valles cercanos a su entorno habitual en busca de otros ejemplares, con resultado negativo. La población se limitaba a tres hembras de edad avanzada localizadas en la Faja de Pelay del Parque Nacional de Ordesa. Pronto quedó una sola hembra. No había machos.

Ante esta dramática situación, se encargó al equipo que dirige José Folch, del Servicio de Investigación Agroalimentaria (SIA), la tarea de aplicar a las cabras monteses las técnicas de reproducción asistida que se emplean en animales domésticos. Nos proponíamos la fecundación de la última bucarda con un macho de cabra montés, que es la especie genéticamente más cercana. Decidimos que había que provocar la superovulación de la última hembra y transferir los embriones resultantes a distintas cabras domésticas que servirían de madres de alquiler. La puesta a punto de estas técnicas se realizó con ejemplares de una subespecie de cabra montés no amenazada (la *Capra pyrenaica hispanica*) capturados en la reserva de Tortosa-Beceite.

A partir de este momento, se realizaron en el SIA muchos trabajos pioneros relacionados con la cabra montés. Bajo la dirección de Alberto Fernández-Arias, se desarrollaron técnicas de captura científica de cabras monteses en su medio natural que implicasen el menor riesgo posible para los animales. Además, se perfeccionó el diseño de las instalaciones y se desarrollaron técnicas óptimas de manejo en cautividad de esta especie, altamente sensible al estrés. En colaboración con la Universidad de Barcelona, se caracterizó al bucardo desde el punto de vista genético mediante análisis del ADN. Así se llegó a una conclusión sospechada: el bucardo era un animal genéticamente distinto de las otras cabras monteses. Se trataba, por tanto, de un animal único en el mundo.



EL BUCARDO puede ser el primer animal extinguido que reaparezca gracias a la clonación.

Es en el campo de la reproducción asistida donde más se ha avanzado. A lo largo de los años noventa, se estudiaron las características reproductivas de la cabra montés, estableciéndose los perfiles hormonales y las duraciones del ciclo ovárico y de la gestación. Sabemos, por ejemplo, que el período reproductivo de la cabra montés se inicia en noviembre y puede prolongarse hasta marzo.

En 1990 se llevaron a cabo los primeros tratamientos hormonales de superovulación y las primeras recogidas de embriones destinados a la transferencia a cabras domésticas. No fue empresa fácil. El tiempo de gestación de la cabra doméstica difiere del habitual en la cabra montés; además, se producen fenómenos de rechazo del feto por parte de la madre, que lo considera un ser extraño.

Las primeras transferencias de embriones de montés a doméstica fracasaron. Pero se encontró la solución al implantar, en una misma madre doméstica, un embrión de montés junto a otro de doméstica. De ese modo se "engañó" a la cabra receptora para que mantuviera la gestación hasta el final. En 1991 nacía "Pepito", un cabrito montés venido al mundo por transferencia interespecífica.

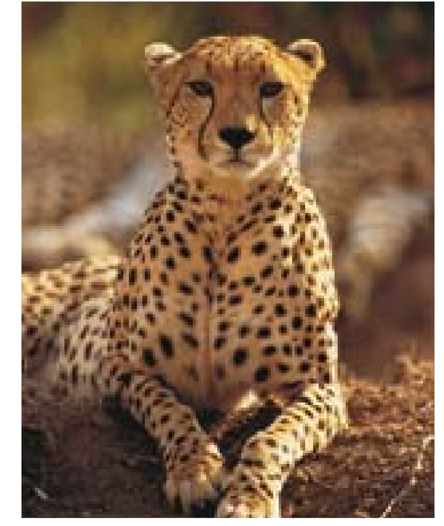
Hoy se sigue una estrategia distinta. A lo largo de estos años, se ha estudiado la hibridación de la cabra montés con la doméstica y se ha comprobado que las hembras híbridas son mejores receptoras para la gestación de cabritos monteses. También en 1991 se congeló por primera vez semen de esta especie.

Para intentar la reproducción de la bucarda, se trasladó a Ordesa un macho montés. Queríamos que este macho fecundase la bucarda en condiciones naturales. Para saber si había quedado preñada hubo que desarrollar, por primera vez en España, un diagnóstico de gestación basado en la determinación de ciertas hormonas en las heces. Tarea que realizó José Luis Alabart. Con este fin, durante dos épocas sexuales, Juan Seijas, responsable en Ordesa del seguimiento de la bucarda, obtuvo muestras de heces que fueron enviadas al laboratorio del SIA. La bucarda se encontraba gestante en las dos ocasiones, pero en ambas perdió el cabrito que portaba.

Al no ser posible la gestación en condiciones naturales, se optó por extraer células de la hembra para conservar material genético con vistas a una futura clonación. Un equipo dirigido por A. Fernández-Árias capturó la bucarda en la escarpada Faja de Pelay. Obtuvieron muestras de tejidos que fueron trasladas al SIA; de ellas Begoña Aguilar extrajo células que fueron cultivadas y congeladas. Se dispone de un importante stock de las mismas. Durante la captura, se colocó al animal un collar de radio-seguimiento que permitió conocer el momento en el que, nueve meses más tarde, moría aplastado por un árbol.

El SIA de Zaragoza cuenta con el material genético de la bucarda extinta y con experiencia en transferencia de embriones interespecífica en el género *Capra*. Se dan por tanto las condiciones para emprender la clonación de la bucarda. Es lo que pretendemos hacer en colaboración con investigadores del INIA (España), del INRA (Francia) y con la aportación técnica de ACT (Estados Unidos). Gracias al esfuerzo de todos, estamos convencidos de que en un próximo futuro, por primera vez en la historia, un animal de una especie extinta podrá reaparecer.

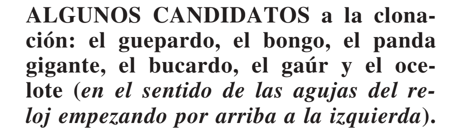
—*José Folch, Begoña Aguilar y Alberto Fernández-Arias*
Servicio de Investigación Agroalimentaria, Zaragoza



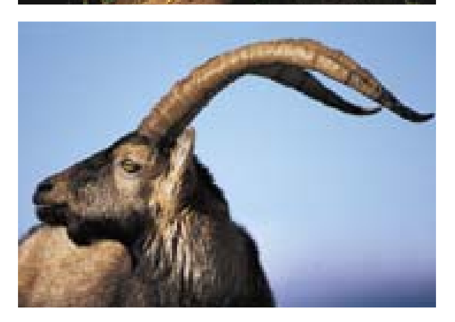












ALGUNOS CANDIDATOS a la clonación: el guepardo, el bongo, el panda gigante, el bucardo, el gaúr y el ocelote (*en el sentido de las agujas del reloj empezando por arriba a la izquierda*).

bra. ACT se dispone a intentar producir un macho. Para ello, habrá que quitar uno de los cromosomas X de una de las células de la hembra de bucardo y, mediante el empleo de una pequeña célula artificial llamada microsoma, añadir un cromosoma Y procedente de un macho de cabra montés. Esta técnica se ha aplicado ya a la manipulación de cromosomas humanos, pero nunca se ha empleado en clonación.

¿Por qué clonar?

Pese a la polémica que rodea a la clonación de especies amenazadas, estamos convencidos de su importancia en los programas de gestión de las especies en peligro. Unos adversarios aducen que podría restringir aún más la diversidad genética en declive de estas especies. No es verdad. Somos partidarios de establecer una red mundial de depósitos donde mantener tejidos congelados de todos los individuos de una especie amenazada de los que puedan extraerse muestras. Estas células —al igual que el semen y embriones que se almacenan ya en los "zoos congelados" en diversos parques zoológicos— podrían servir como seguro genético para la reconstitución de una especie. Tal empeño resultaría bastante económico: un congelador de un metro cúbico de capacidad puede contener más de 2000 muestras, sin apenas consumir electricidad. Hasta la fecha, sólo AICRES y el Centro para la Reproducción de Especies Amenazadas del Zoo de San Diego mantienen bancos de células congeladas aptas para clonación.

Otros opositores afirman que la práctica de la clonación podría restar fuerza a los proyectos de la conservación del medio. En nuestra opinión, aceptando que el mantenimiento del hábitat sea la piedra angular de la conservación de especies, no resulta menos cierto que algunos países son demasiado pobres o sus condiciones demasiado inestables para afrontar unas medidas continuadas de conservación. Por si fuera poco, el crecimiento incesante de la especie humana terminará por hacer imposible salvaguardar el medio natural de algunas especies. La clonación por transferencia de núcleos interespecífica ofrece la posibilidad de disponer de material genético de éstas, sin necesidad de mantener grupos de animales en cautividad.

Se objeta también que la clonación de especies amenazadas desviaría fondos concedidos para el mantenimiento del hábitat. Muy al contrario. No todos los donantes potenciales están dispuestos a subvencionar proyectos destinados a frenar la progresiva destrucción del medio. Y sí hay personas e instituciones que querrían sufragar la clonación u otras técnicas de reproducción asistida.

Ahora es el momento de actuar.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PRESERVATION OF ENDANGERED SPECIES AND POPULATIONS: A ROLE FOR GENOME BANKING, SOMATIC CELL CLONING, AND ANDROGENESIS? Graham E. Corley-Smith y Bruce P. Brandhorst en *Molecular Reproduction and Development*, vol. 53, n.º 3, págs. 363-367; julio, 1999.

BIODIVERSITY HOTSPOTS FOR CONSERVATION PRIORITIES. Norman Myers, Russell A. Mittermeier, Cristina G. Mittermeier, Gustavo A. B. da Fonseca y Jennifer Kent en *Nature*, vol. 403, n.º 6772, págs. 853-858; 24 de febrero, 2000.

VANISHING BEFORE OUR EYES. E. O. Wilson en *Time* (Informe especial sobre El Día de la Tierra 2000), págs. 29-34; abril-mayo, 2000.

Hispania romana

¿Un fanum en Tiedra?

La existencia de un antiguo núcleo de población y la aparición de cerámica celtibérica y sigillata en torno a la ermita de Nuestra Señora de Tiedra Vieja, en las afueras de Tiedra (población de Valladolid limítrofe con Zamora), fue documentada hace tres décadas por P. de Palol y F. Wattenberg, y más tardíamente por T. Mañanes. Pero nadie había aludido a la gran cantidad de tégulas y ladrillos de cuarterón que se encuentran en este lugar y que es sugestiva de la existencia de una edificación notable.

La hipótesis de que dicha edificación correspondiera a un fanum (templo de época romana) cobra consistencia con nuestro hallazgo, en superficie, de un número significativo de fichas de arcilla, utilizadas probablemente con carácter oracular por el procedimiento adivinatorio de las sortes, fragmentos de lucernas y un colgante itifálico de bronce susceptible de interpretación alternativa como amuleto u objeto votivo (la "fuente de hijos" como símbolo del regazo materno).

Por otra parte, la iconografía de la terra sigillata hispánica figurada, que se recoge en el yacimiento, es singularmente rica en divinidades, lo que puede apoyar la idea de una utilización religiosa de tales vasijas. Adicionalmente, la tradición refiere el hallazgo de idolillos en el término municipal, aunque sin especificar si fueron encontrados en Tiedra Vieja o en otros pagos.

La ermita actual, de carácter monumental y dotada de una antigua hospedería, data del primer cuarto del s. XVII. Existe constancia documental de que se erigió tras demoler el cuerpo de iglesia anterior hasta los cimientos, razón que justifica la ausencia en superficie de restos de construcción de épocas anteriores (salvo la existencia en los alrededores de fragmentos de mortero, de época romana, pintados de color rojo; y de las tégulas y ladrillos referidos más arriba). La tradición se limita a hacer constar la milagrosidad de Nuestra Señora en ese lugar, atestiguada por multitud de exvotos, pero no es explícita en cuanto a si el culto actual es sucesivo a un culto anterior. En todo caso, el culto cristiano parece ser muy antiguo en Tiedra, como indica la pila de mármol agallonada (con un Cantharus, un pez, dos pájaros, una ballena y una serpiente) que, según se cree, apareció a unos 4 km de Tiedra Vieja, entre las ruinas de una villa, en 1957, y que, desde entonces, se conserva en el Museo Arqueológico de Valladolid.

Las dimensiones de la capilla mayor del santuario son, en su exterior, de 21,7 m × 10,0 m, aunque existe una presunción de que las dimensiones del edificio primitivo fueran 21,7 m × 16,5 m. De cualquier modo, la longitud, constante, corresponde a la usual para templos romanos como los isiacos de Vindobala, en Rochester (21 m × 15 m), o los de Santa Clara de Avedillo (20 m × 12 m) y Tardobispo (21 m × 15,6 m), en Zamora.

La peregrinación al presunto santuario de Tiedra pudo facilitarse a cuenta de la existencia de una calzada romana coincidente con la Galiana o cordel de ganados que, procedente de Mérida y pasando por Tiedra, llevase a los Pirineos. Al respecto, existe un intento de hacer corresponder el lugar de Tiedra con la mansión 435,1 del Itinerario de Antonino (Amallobriga) y con la 313,2 del Ravennate (Abulobrica).

JESÚS MARTÍN GIL
y FRANCISCO J. MARTÍN GIL
Universidad de Valladolid





Colgante itifálico, fragmento de lucerna y fichas de cerámica halladas en superficie en las inmediaciones del santuario de Nuestra Señora de Tiedra Vieja, Tiedra (Valladolid), donde se sospecha que existió un templo romano (izquierda). *Imagen del dios Mercurio en un fragmento de terra sigillata hispánica* (derecha)

Matorrales mediterráneos

Lavandula stoechas

En la península Ibérica sometida al clima mediterráneo el matorral domina la vegetación de los montes. Sustituye a las formaciones arbustivas y al bosque en respuesta a las perturbaciones reiterativas, fuego, roza o tala. El matorral está formado fundamentalmente por cistáceas y labiadas, plantas pequeñas, aromáticas, con hojas generalmente pubescentes y flores vistosas y coloreadas.

Se trata de especies caracterizadas por su introducción pionera y su capacidad de colonizar zonas perturbadas. ¿Cómo se estructura la biomasa aérea del matorral en una zona recién colonizada, tras una fuerte perturbación? Para resolver la cuestión centramos nuestro estudio en la lavanda (*Lavandula stoechas*).

Perteneciente a la familia de las Labiadas, *L. stoechas* abunda en las zonas secas y soleadas del sur de la Península, desde el nivel del mar hasta los 1000 m de altitud. Es una especie aromática, que puede alcanzar 1,5 m de altura; en primavera produce inflorescencias llamativas de color púrpura que terminan en 3-5 brácteas del mismo color.

Al abordar nuestro trabajo, se acotó una parcela experimental de 30 × 30 m dominada por *L. stoechas* que previamente había sido ocupada por *Eucalyptus* y rozada en el otoño de 1986. La parcela se encontraba en una ladera de solana, en la Sierra Norte de Sevilla. El clima de la zona es mediterráneo, con invierno suaves y húmedos y veranos secos y calientes y una precipitación media anual de 650 mm.

A partir de la perturbación se produjo una germinación explosiva de *L. stoechas*, que alcanzó en 1989 un 76 % de la cobertura del matorral. Se marcaron todas las plántulas aparecidas; y así, en julio de 1989, cuando se inició el estudio, se conocía perfectamente la edad de los individuos.

Durante tres años consecutivos se siguieron estos individuos marcados, midiendo el volumen de la copa y el porcentaje de luz visible exterior que llegaba a la base de la planta. Se cortaron 20 plantas en estratos horizontales de 10 cm, separando los órganos, secándolos y pesándolos, con objeto de conocer no sólo la biomasa de los individuos, sino también su estructura vertical.

Cinco individuos se analizaron con un método original de frecuencias, basado en colocar una rejilla vertical frente a la planta e ir registrando la presencia de los órganos en cada celdilla. Permite este método cuantificar de forma no destructiva la estructura vertical de los individuos. Los resultados obtenidos revelaron una imagen digital de la estructura aérea, donde se observaba que la distribución de las hojas obedecía a un conjunto de ramas eminentemente verticales que partían de una base común, con algunos rebrotes; las inflorescencias ocupaban el extremo superior de las ramas.

Mediante el análisis de los individuos de distintas edades se llegaba al conocimiento de los cambios temporales experimentados por estas plantas. En un comienzo se producía un aumento en la biomasa de todos los órganos, con un mayor incremento en la biomasa de ramas, alcanzándose un máximo en las plantas de 4 años de edad y, a partir de ahí, una degeneración de la copa con pérdida de todos los órganos. El cociente entre biomasa de hoja y madera seguía un descenso exponencial con la edad; existía, por tanto, un aumento de los tejidos respiratorios frente a los fotosintéticos. Las plantas iban adquiriendo un tamaño creciente y aumentaba el volumen ocupado por la copa; sin embargo, la densidad, expresada en gramos de biomasa por decímetros cúbicos de volumen, experimentaba primero un aumento, logrando el máximo a los 4 años, para descender luego de forma brusca.

Estos resultados llevaban a pensar que había un proceso de organización estructural hasta los 4 años y, una rotura y desorganización a partir de esta edad. Dimos con la explicación de lo que estaba ocurriendo al analizar los perfiles verticales de biomasa de hojas, madera e inflorescencias en plantas de 2 a 4 años.

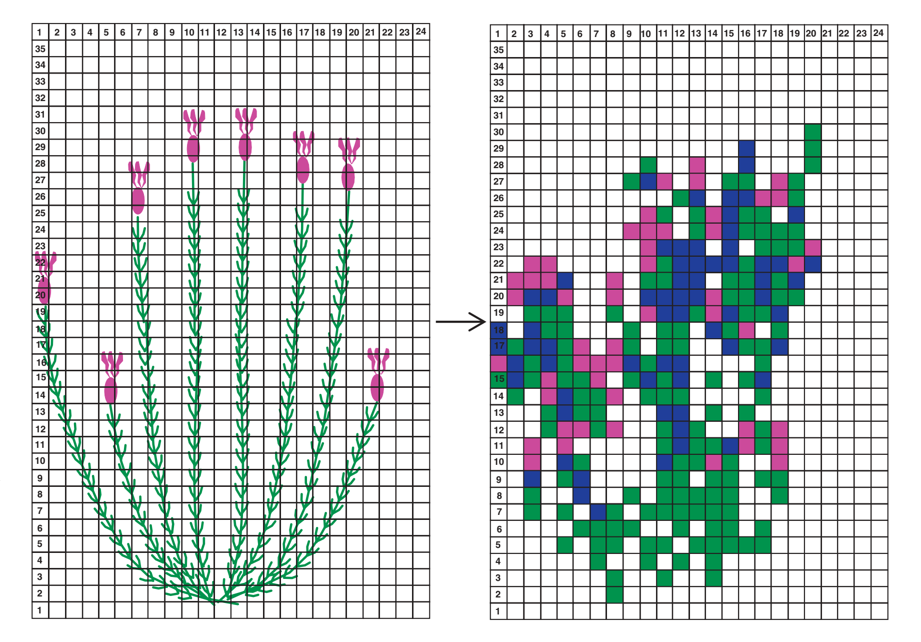
Las plantas de 2 años mostraban una forma juvenil, con una altura media entre 70-80 cm. Las hojas se distribuían a lo largo de todo el perfil, con un máximo en el centro de la copa; las inflorescencias se situaban en la parte superior. El cociente hoja/madera era de 0,4; el volumen medio ocupado por la copa, de 84 dm^3; la densidad, de 1,8 g/dm^3.

Las plantas de 3 años presentaban una forma parecida a las anteriores, con mayor altura, biomasa y volumen.

Las plantas de 4 años alcanzaban la altura máxima entre 140-150 cm y una estratificación de órganos bien definida, con troncos y ramas en la base, numerosos tallos en la parte media y hojas e inflorescencias por encima de los órganos estructurales. Estas plantas ofrecían los valores máximos de densidad de la copa 2,4 g/dm^3 y un cociente de hoja/madera de 0,2.

Las plantas de 5-6 años mostraban una estructura rota y abierta con signos de senescencia. La biomasa foliar y reproductora se había reducido enormemente,

1. Lavandula stoechas*, una especie de matorral típica de los montes mediterráneos del sur de la península Ibérica. En primavera produce unas llamativas inflorescencias de color púrpura*



2. El método de frecuencias utilizado se basaba en colocar una rejilla vertical frente a la planta, e ir registrando en cada celdilla la presencia de los distintos órganos. El resultado obtenido con este método era una imagen digital de la estructura aérea de la planta. En la imagen se representan la distribución de hojas (verde)*, inflorescencias* (púrpura) *y solapamiento de ambas en la misma celdilla* (azul)

con las hojas restringidas a los extremos de los tallos y algunos rebrotes en la base. El volumen de la copa era grande (superior a 500 dm^3), pero la densidad pequeña (0,7-0,9 g/dm^3), pues los órganos se habían perdido y la estructura era laxa y abierta. El cociente hoja/madera alcanzaba un valor mínimo de 0,01.

Los resultados de este estudio ponían de manifiesto la existencia de tres fases en el ciclo de vida de la especie. Una primera fase de crecimiento y organización, con producción de órganos y ocupación del espacio. Una segunda de madurez, en la que se registraban los valores máximos de biomasa y densidad. Y una tercera de senescencia, con pérdida de estructuras activas y acumulación de biomasa muerta.

La estructura modular de las plantas explica bien este proceso. En las etapas iniciales, la producción de nuevos módulos es superior a la muerte modular, lo que lleva a un crecimiento neto de la copa. Por contra, en las etapas finales la muerte modular supera la producción de nuevos módulos, con una desorganización es-

3. En la parte superior de la figura, se representan de forma esquemática los cambios temporales operados en la copa de Lavandula stoechas, *en plantas de 2-6 años. En la parte inferior, los perfiles verticales de biomasa de hojas, leño e inflorescencias en las mismas plantas, que ponen de manifiesto la dinámica estructural y las distintas fases encontradas*

tructural y una acumulación de biomasa muerta.

El proceso descrito en *L. stoechas* parece ser común en jarales, tomillares y otros matorrales pioneros. La acumulación de biomasa muerta, la abundancia de aceites esenciales, junto con las altas temperaturas y ausencia de precipitación, se convierten en un riesgo potencial de incendios estivales. El fuego destruye a los individuos, pero facilita la germinación de nuevas plántulas iniciando otra vez la sucesión primaria.

M.ª CRUZ DÍAZ ANTUNES-BARRADAS,
M. ZUNZUNEGUI y F. GARCÍA NOVO
Dpto. de Biología Vegetal y Ecología
Facultad de Biología.
Universidad de Sevilla

Leche

Métodos de conservación

En los países industrializados, las ganaderías productoras de leche de vacuno están dotadas de ordeño mecánico y tanques de refrigeración, donde se almacena y se mantiene hasta su retirada por camiones-cisterna isotérmicos que la trasladan al centro de recepción.

Pero la leche es un alimento perecedero, dado que constituye un medio favorable para la supervivencia y multiplicación de microorganismos. El control de los microorganismos mesófilos por refrigeración ha prolongado el período de conservación de la leche cruda en la granja, reduciendo así los costes de distribución inmediata y otros. Cuando la leche ordeñada llega a la central, no siempre se procesa en seguida; mientras tanto, se la retiene refrigerada en silos de acero inoxidable. Si ha de permanecer almacenada varios días se somete a un proceso de termización (63-65 ºC durante 15-20 segundos), seguida de un enfriamiento rápido a 4-7 ºC, para disminuir la carga microbiana y controlar la proliferación de bacterias esporuladas.

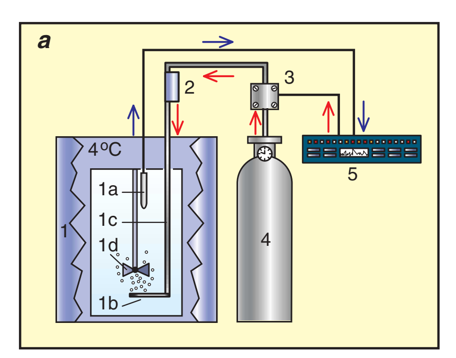
El tratamiento térmico posterior de la leche elimina los microorganismos patógenos y reduce la carga microbiana, sin que se alteren apenas la composición y características organolépticas del producto. La pasterización, por ejemplo, reduce pero no elimina la carga microbiana de la leche, permitiendo aumentar algunos días su conservación en refrigeración; las normas de la Unión Europea exigen una temperatura mínima de 71,7 ºC durante 15 segundos o una combinación temperatura/tiempo equivalente.

La esterilización persigue, por su parte, una conservación indefinida de la leche tras la destrucción total de las formas vegetativas de los microorganismos e inactivación de las esporas. Se puede realizar en los recipientes herméticos donde se envasa —y se calienta a 110-120 ºC durante 20 a 40 minutos— o en flujo continuo (UHT), aplicando altas temperaturas durante un período corto de tiempo (135-150 ºC, a lo largo de 2 a 10 s).

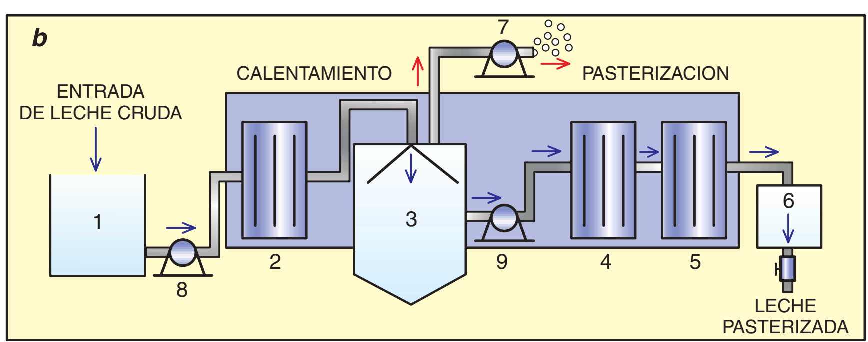
La refrigeración, al eliminar la competencia de la microbiota mesófila, favorece la selección y proliferación de microorganismos psicrotrofos, capaces de multiplicarse a temperaturas de refrigeración. La mayoría de los psicrotrofos aislados en leche cruda son bacilos gram negativos no esporulados del género *Pseudomonas*. Estos microorganismos se eliminan con los tratamientos térmicos por calor aplicados a la leche en la industria, pero muchos sintetizan enzimas degradativas extracelulares, principalmente proteasas y lipasas, que permanecen activas después del tratamiento térmico y deterioran lípidos y caseínas.

Una proporción variable de psicrotrofos alterantes son bacterias gram positivas termodúricas que sobreviven a la pasterización, e incluso a tratamientos térmicos más enérgicos. La mayoría pertenecen al género *Bacillus*, cuyas formas vegetativas se destruyen con los tratamientos térmicos. Sus endosporas, termorresis-

METODO	ACCION
Refrigeración	
(4 a 7 ºC)	Disminución de la tasa de multiplicación microbiana
Termización	
(63-65 ºC, 15-20 s, enfriamiento rápido 4-7 ºC: prueba fosfatasa positiva)	Reducción de la carga microbiana; induce paso de esporas a formas vegetativas sensibles a tratamiento térmico posterior
Pasterización	
(71,7 ºC, 15 s: prueba fosfatasa negativa, peroxidasa positiva)	Reducción de la carga microbiana y eliminación de patógenos
Esterilización	
Recipientes herméticos (110-120 ºC, 20-40 min.) UHT (135-150 ºC, 2-10 s)	Destrucción total de las bacterias e inactivación de las formas de resistencia (esporas)
Microfiltración	
Filtración de la leche a través de membranas	Separación de bacterias y esporas del resto de los componentes de la leche
Bactofugación	
Centrifugación de la leche a baja velocidad	Separación de bacterias y esporas del resto de los componentes de la leche
Adición de bacterias lácticas	
(0,1 a 0,5%)	Disminución del potencial redox, competición por nutrientes y producción de sustancias antimicrobianas: H_2O_2, bacteriocinas (nisina) e intermediarios del metabolismo del citrato
Adición de sustancias químicas	
Conservantes (benzoatos y sorbatos)	Inhibición del crecimiento microbiano
Peróxido de hidrógeno-tiocianato	Activación del sistema lactoperoxidasa
Glucosa-glucosa oxidasa	Activación del sistema lactoperoxidasa
Adición de gases en refrigeración	
Nitrógeno Dióxido de carbono	Aumento de la fase de latencia, disminución de la tasa de crecimiento y desplazamiento del O_2



1. *Inyección automática de CO_2. Una sonda* (1a) *mide el* pH *de la leche y transmite la señal a una unidad control* (5), *programada en un rango de valores de* pH. *La unidad se halla conectada a una válvula solenoide* (3), *que permite la entrada de CO_2. El gas, procedente de una botella a presión* (4), *circula a través de un rotámetro que mide el caudal. El CO_2 difunde a la leche a través de un tubo de acero inoxidable* (1c) *conectado a un difusor* (1b). *Un agitador* (1d) *distribuye uniformemente el gas en la leche. Cuando el* pH *está por encima del máximo establecido, se abre la válvula solenoide y se inyecta CO_2 hasta llegar al* pH *mínimo del rango, momento en el cual se cierra la válvula, cesando la entrada del gas*



2. *Proceso de desgasificación-pasterización. Una bomba impulsora* (8) *facilita el paso de la leche refrigerada desde el depósito pulmón* (1) *al precalentador de placas* (2), *donde se eleva moderadamente la temperatura. La leche calentada se trasvasa a un tanque de desgasificación* (3), *conectado a una bomba de vacío* (7) *que permite la eliminación del gas. La leche desgasificada retorna, impulsada por una bomba* (9), *a la segunda etapa del pasterizador de placas* (4)*; aquí se completa el proceso. En la tercera etapa del pasterizador* (5) *la leche, ya pasterizada, sale al exterior* (6) *después de sufrir un enfriamiento por intercambio indirecto con la leche cruda que entra a 4 ºC*

tentes, pueden, sin embargo, germinar en la leche de larga duración (UHT y esterilizada en botellas) y producir alteraciones.

Para prevenir la proliferación de microorganismos psicrotrofos, se han desarrollado diversos métodos complementarios a las medidas de higiene, refrigeración y tratamientos térmicos. Entre tales métodos se cuentan la adición a la leche cruda de bacterias lácticas y conservantes (benzoatos y sorbatos) y la activación de los inhibidores naturales de la leche, de los cuales el más eficaz es el sistema de la lactoperoxidasa.

La enzima lactoperoxidasa se encuentra en exceso en la leche. Ejerce una fuerte acción bactericida y se activa en presencia de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y tiocianato, cuyas concentraciones son, sin embargo, limitantes en leche cruda. Por tanto, la activación de la lactoperoxidasa requiere la adición a la leche de pequeñas cantidades de tiocianato, H_2O_2 o de algún sistema capaz de generarlo.

Por otra parte, para minimizar el deterioro producido por los esporulados en la leche, las técnicas más empleadas son la bactofugación, que reduce el número de esporas por centrifugación, y la microfiltración, que las separa del resto de los componentes de la leche por filtración a través de membranas.

La inyección de dióxido de carbono (CO_2) a la leche cruda refrigerada es un método barato, seguro y de fácil aplicación. Se ha demostrado en el laboratorio que unas concentraciones de CO_2 entre 10 y 30 milimolar (*p*H en leche entre 6,0 y 6,4) inhiben la proliferación de psicrotrofos en leche cruda refrigerada. El CO_2 actúa como agente bacteriostático. La aplicación del método en la industria y en la ganadería presenta el problema del cambio de escala. Además, la presencia de CO_2 en la leche provoca alteraciones y supone un riesgo de coagulación por excesiva acidez o aumento de volumen del gas ocluido en el líquido durante el tratamiento térmico en las plantas industriales.

En el Instituto de Productos Lácteos de Asturias hemos desarrollado un procedimiento de inyección automática de CO_2 a la leche cruda en los tanques de refrigeración, en función de los valores de *p*H de la leche medidos de forma continua. La acidificación en estas condiciones inhibe la proliferación microbiana y aumenta su período de almacenamiento en refrigeración, sin producir modificaciones apreciables sobre los componentes de la leche: caseínas, proteínas del suero, ácidos orgánicos, volátiles y vitaminas.

La desgasificación por calor-vacío, previa a la pasterización, puede eliminar casi totalmente el CO_2 sin afectar a las propiedades organolépticas de la leche. El gas residual permite prolongar la vida útil de la leche pasterizada, al inhibir la proliferación de los microorganismos que sobreviven a la pasterización.

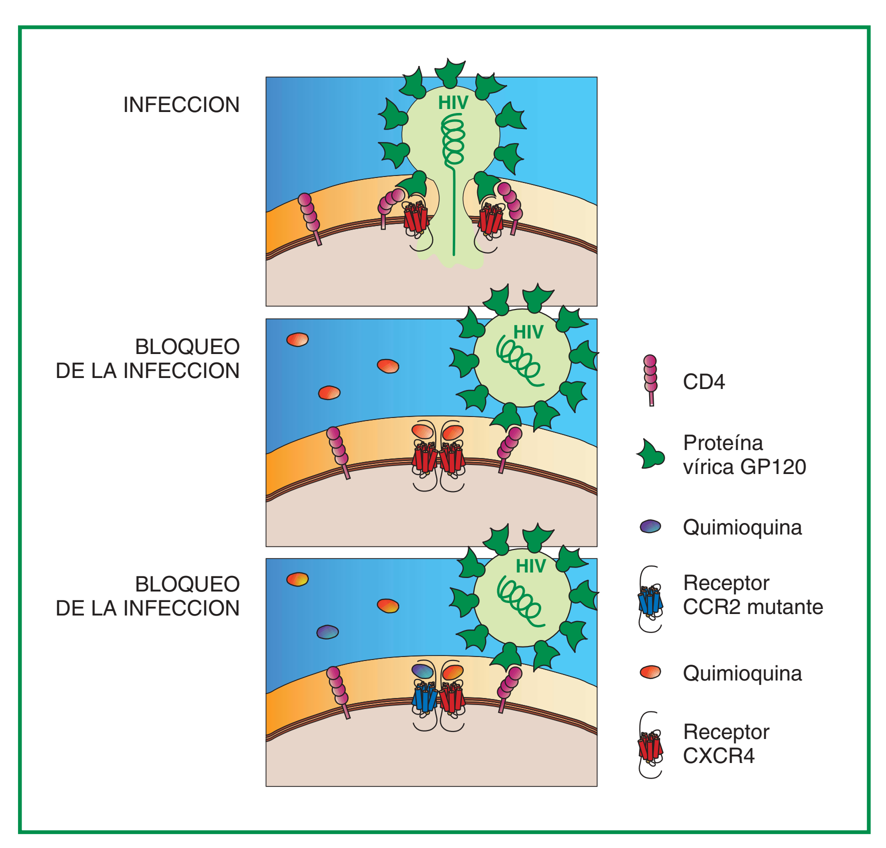
CLARA GONZÁLEZ DE LOS REYES-GAVILÁN, PATRICIA RUAS MADIEDO y JUAN CARLOS BADA GANCEDO
Instituto de Productos Lácteos de Asturias, CSIC

Sida

El papel de las quimioquinas

Desde que la gran pandemia del siglo XX, el sida, síndrome de la inmunodeficiencia adquirida, apareció en 1981, constituye, por su patogenicidad, transmisibilidad y virulencia, uno de los mayores problemas de salud pública. De ahí los muchos esfuerzos realizados por aislar el agente causal, un retrovirus denominado VIH, y descubrir su mecanismo de penetración y replicación en las células.

En 1986 se determinó que la molécula CD4 situada en la superficie de ciertas células constituía el principal punto de anclaje del virus, su receptor. Pero la interacción con CD4 no bastaba para permitir la entrada



El virus del sida se debe unir a los receptores de quioquinas y a CD4 para infectar a la célula diana (arriba). *La interacción entre algunas parejas de receptores de quimioquinas, como son CXCR4 o CCR5, puede bloquear dicha interacción* (centro). *La presencia en algunos individuos de mutaciones en receptores de quimioquinas que posibilitan la formación de nuevas parejas entre receptores de quimioquinas, supone un aumento en la resistencia a la infección* (abajo)

del virus en la célula diana. Comenzó así la búsqueda de otras moléculas correceptoras.

En 1995 el grupo de Robert Gallo daba cuenta de que algunas quimioquinas bloqueaban la infección en ensayos realizados *in vitro*. Al año siguiente, varios grupos publicaban de forma simultánea que los correceptores empleados por el virus eran receptores de quimioquinas; en concreto, CCR5 y CXCR4. Este descubrimiento no sólo permitió explicar la actividad antivírica que poseían las quimioquinas, sino también entender el tropismo vírico, esto es, la tendencia de cada cepa a infectar unas u otras células.

Las quimioquinas, o factores quimiotácticos, pertenecen a una nueva familia de proteínas proinflamatorias, que controlan en buena medida los procesos implicados en la respuesta inmunitaria frente a patógenos, virus o bacterias, células tumorales e incluso contra las agresiones físicas. Se las ha asociado con patologías relacionadas con la infiltración tisular (asma, artritis reumatoide, glomerulonefritis, rechazo de tumores, etc.).

Además de las quimioquinas inducibles, segregadas en momentos concretos, existen otras constitutivas que participan en la organización estructural del sistema inmunitario. Las quimioquinas actúan a través de su unión con receptores de la superficie de la célula diana.

Estos receptores son proteínas unicatenarias. Cruzan la membrana celular siete veces y pertenecen a la familia de receptores acoplados a proteínas G, esto es, a proteínas que unen nucleótidos de guanina. Las zonas del receptor que quedan hacia el exterior celular intervienen en la unión de la quimioquina, mientras que las zonas que dan al interior celular acoplan el receptor a la maquinaria señalizadora, necesaria para inducir la respuesta celular.

La cascada señalizadora se inicia con la dimerización de los receptores resultante de los cambios conformacionales que provoca la unión del ligando. Dicha unión activa dos vías fundamentales, la de las quinasas JANUS y la de las proteínas G. La vía de las quinasas JANUS, tras diversas etapas de fosforilación, conduce a la activación de factores de transcripción y a la expresión génica. Por su parte, la vía de las proteínas G se halla involucrada en movimientos de las reservas de calcio intracelular y reorganización del citosqueleto celular.

Las cepas de virus responsables de la transmisión, aisladas de individuos asintomáticos seropositivos, necesitan unirse al receptor de quimioquina CCR5, mientras que las cepas de virus que aparecen más tardíamente en el curso de la infección optan por el CXCR4 o por ambos receptores.

De la importancia del CCR5 para la transmisión vírica nos habla el que aproximadamente un 1 % de los individuos caucasianos sean resistentes a la infección por HIV-1 porque poseen una mutación en ese receptor que impide su normal expresión en la membrana celular.

En 1997 Stephen J. O'Brien describía otro polimorfismo cuya frecuencia alélica afectaba a un 10-20 % de la población según la etnia y que provocaba un retraso de entre 2 y 4 años en el desarrollo del sida. El polimorfismo afectaba, sin embargo, a un receptor de quimioquinas, el CCR2, cuyo papel como correceptor vírico se limitaba a cepas muy determinadas y siempre en ensayos *in vitro*; consistía en una mutación puntual del aminoácido que ocupa la posición 64: la valina correspondiente se sustituye por isoleucina. El correceptor mutante se denominó CCR2V64I.

Se sabía que el polimorfismo del CCR2 iba acompañado de una disminución en la superficie celular de los receptores CCR5 y CXCR4, lo que sin duda dificultaba la entrada del virus y replicación consiguiente. Ahora conocemos que cuando algunos de estos receptores se activan por sus respectivos ligandos se produce la dimerización cruzada entre ellos. Tal heterodimerización trae consigo un incremento de sensibilidad para sus respectivos ligandos; comporta también un mecanismo de control de la respuesta. Heterodimerizan las parejas de receptores CCR2V64I/CCR5 y CCR2V64I/CXCR4, pero no CCR2/CXCR4. En esa capacidad de unión se esconde la disminución de los niveles de receptores en la membrana celular y la resistencia a la infección.

El análisis de la interacción entre quimioquinas y sus receptores per-

mitirá seleccionar nuevos compuestos, capaces de competir o bloquear la entrada del virus a través de los receptores que éste utiliza.

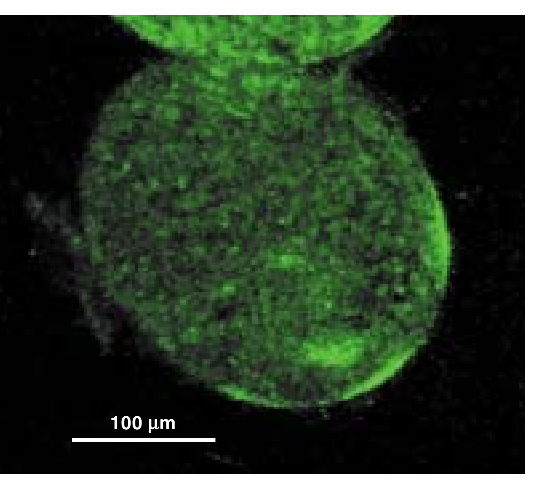
JOSÉ MIGUEL RODRÍGUEZ-FRADE
JOSÉ MARIO MELLADO GARCÍA
Dpto. de Inmunología y Oncología.
CSIC-Pharmacia & Upjohn
Centro Nacional de Biotecnología,
Madrid

Mundo vivo

Sulfobacteria gigante

En muestras recogidas a 100 metros de profundidad en la costa de Namibia se han descubierto bacterias descomunales, que se distinguen a simple vista. Pueden medir hasta 0,75 mm de diámetro y centuplican el tamaño de la mayoría de los microorganismos conocidos.

Heide Schulz, que estaba realizando su tesis doctoral en el Instituto Max Planck de Microbiología Marina de Bremen, observó cadenas de células redondeadas parecidas a collares de perlas. Sospechó que se trataba de bacterias del azufre. De ahí su denominación: "Perla de azufre de Namibia" (*Thiomargarita namibiensis*). Para estudiarla se reunió a un equipo de procedencias y nacionalidades diversas, integrado por Thorsten Brinkhoff, de la Universidad de Oldenburg, Timothy Ferdelman y Bo Barker Jorgensen, del Instituto Max Planck, Mariona Hernández Mariné, de la Universidad de Barcelona, y Andreas Teske, de la Institución Woods Hole de Oceanografía.



1. Fotografía realizada con un microscopio láser confocal de células de Thiomargarita namibiensis*; los ácidos nucleicos se ven teñidos en verde*

Las bacterias se encontraron en el sedimento marino de la costa de Namibia. Esas zonas de Namibia son también áreas de afloramiento o ascensión de masas de agua profundas del océano, ricas en nutrientes, que sirven de sustento al fitoplancton y, por tanto, a otros organismos. La expedición a las costas de Namibia iba en busca de otras dos bacterias del azufre —*Beggiatoa* y *Thioploca*— que ya habían sido estudiadas en las riberas sudamericanas del Pacífico.

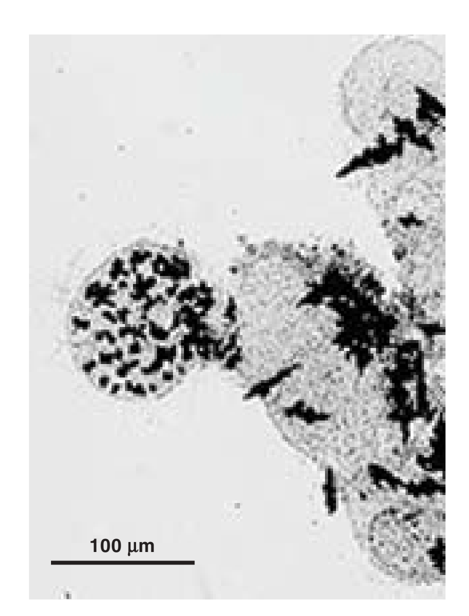
En el sedimento abunda *Thiomargarita*, mientras que escasean *Thioploca* y *Beggiatoa*. Las tres son similares desde el punto de vista genético y se enfrentan al mismo reto ecológico: la oxidación de sulfuros con la ayuda de nitratos.

El mantenimiento de la vida en la Tierra depende del reciclaje constante del carbono, nitrógeno y azufre. Los microorganismos son los actores principales en los ciclos de esos elementos, merced a su capacidad de oxidación y reducción. A través de estas reacciones químicas, dichos elementos llegan a los océanos, los sedimentos y la atmósfera, de lo que se aprovecharán otros seres vivos.

La bacteria gigante *Thiomargarita* constituye, junto a *Thioploca* y a *Beggiatoa*, un pequeño grupo de microorganismos que sirve de puente entre los ciclos del azufre y del nitrógeno. El nitrato está presente en las masas de agua marina de las regiones de afloramiento ricas en plancton, pero no suele llegar a la capa de sedimento, pobre en oxígeno y rico en sulfuros, donde medran estas bacterias.

No obstante su parecido, *Thioploca* y *Thiomargarita* han desarrollado diferentes mecanismos de actuación. Las células de *Thioploca* forman filamentos rodeados de una envoltura mucilaginosa; se deslizan a lo largo de ella, entre la fuente de nutrientes del sedimento y el nitrato de las masas de agua con oxígeno, como si se tratara de un túnel vertical.

Por su parte, las bacterias *Thiomargarita*, inmóviles, forman cortas cadenas ramificadas. Almacenan nitrato en una gran vacuola central, que reluce con un brillo azul verdoso opalescente. Sin esta capacidad de almacenamiento podrían verse en dificultades, pues no pueden desplazarse. A diferencia de *Thioploca*, suspenden, si es preciso, su actividad durante meses hasta que, debido a las corrientes profundas del océano,



2. Fotografía realizada con un microscopio óptico mostrando células de Thiomargarita namibiensis. *Los gránulos negros de la célula del centro están formados por azufre*

vuelven a encontrar los nutrientes que utilizan. Asimismo, resisten altos niveles de oxígeno letales para sus cercanos parientes del género *Thioploca*.

Se especula si estas gigantes oxidadoras de sulfuros y reductoras de nitratos podrían limpiar la contaminación causada por el exceso de nitratos y ayudar a disminuir las perturbaciones derivadas de la carencia de oxígeno en las aguas profundas.

MARIONA HERNÁNDEZ MARINÉ
Facultad de Farmacia
Universidad de Barcelona

Genética de la sordera

Identificación de las moléculas de la audición

La sordera es el defecto sensitivo más frecuente en humanos. Afecta al 10 % de la población. Aproximadamente uno de cada 1000 niños nace sordo, el 4 % de la población pierde la audición antes de los 45 años y una de cada dos personas mayores de 80 años sufre problemas auditivos. A nadie se le escapa su influencia en el desenvolvimiento personal, social y laboral, con alteraciones en el lenguaje, el habla y el desarrollo cognitivo.

La mayoría de los casos presentan una base genética. Y se cifra en más de 50 % de los pacientes un origen hereditario. La extrema complejidad de la herencia de la sordera se explica porque en la audición participan centenares de genes. Cualquier alteración de los mismos podría causar sordera.

Las células sensoriales encargadas de la transformación del sonido en impulso nervioso son las células ciliadas, que se encuentran en el oído interno, concretamente en el órgano de Corti. El escaso número de células ciliadas con que cuenta el individuo, unas 10.000, contrasta con los cientos de millones de células fotoreceptoras de la retina y de neuronas olfatorias. El ápice de las células sensoriales ciliadas se halla bañado por la endolinfa, un fluido con una baja concentración de iones sodio (Na^+) y una alta concentración de iones potasio (K^+). Al transmitirse la señal sonora, se abren unos canales en las células ciliadas que permiten la entrada de iones K^+, provocando una despolarización de la célula y generando el impulso nervioso. Una vez iniciado el impulso nervioso, estos iones deben volver a la endolinfa. Cualquier alteración del proceso puede provocar pérdida de audición.

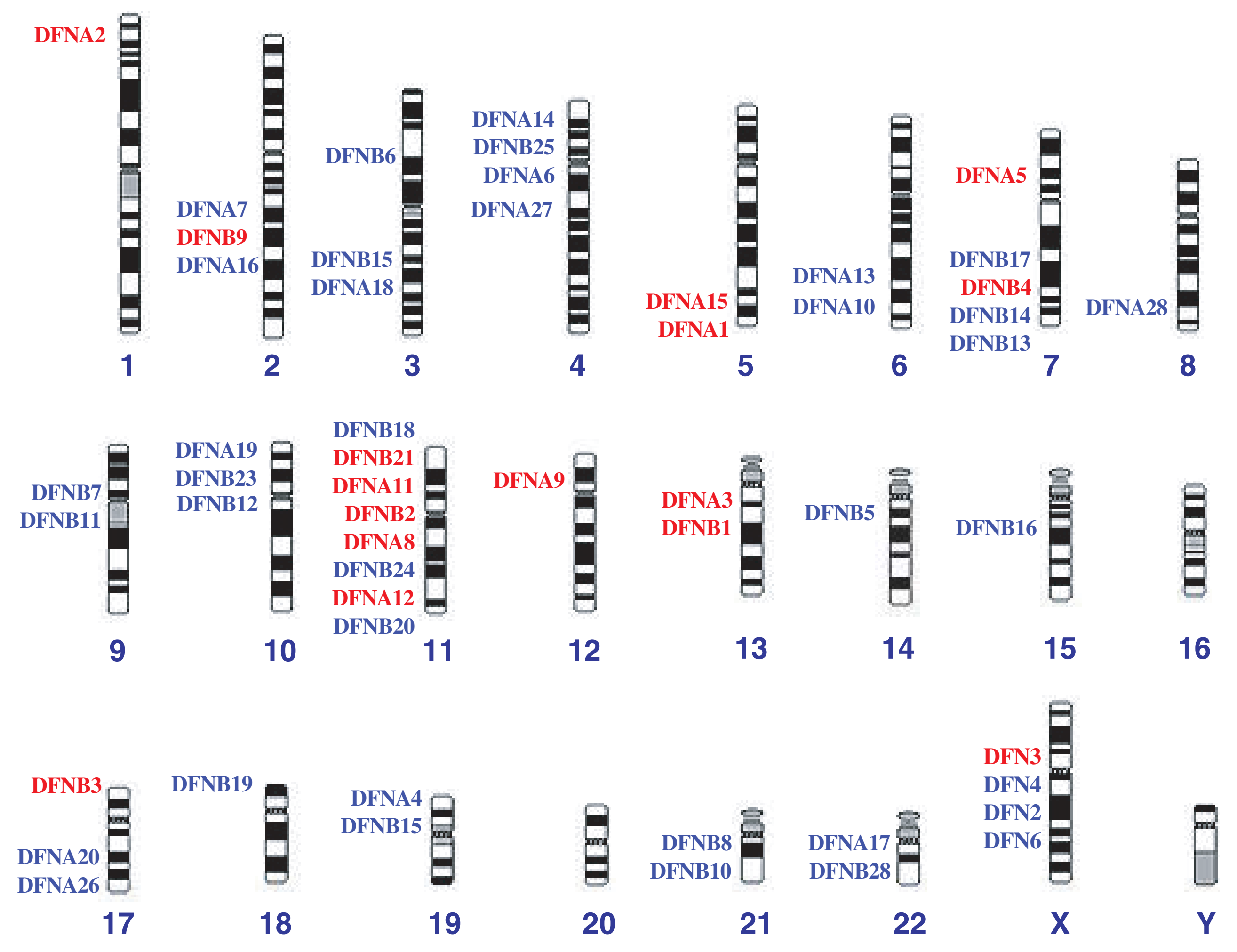
En los últimos años se han registrado grandes avances en la identificación de los genes causantes de sordera. Se considera que hay más de 400 formas de sordera sindrómica (sordera que aparece junto con otros síntomas). De 20 de ellas se conoce el gen responsable. Se han descubierto más de 50 *loci* (localizaciones cromosómicas) implicados en sordera no sindrómica (sordera aislada) y se han identificado 15 genes responsables, entre los cuales hay genes que determinan canales iónicos (*KCNQ4 y PDS*), factores de transcripción (*POU3F4* y *POU4F3*), proteínas musculares (*MYO7A y MYO15*), conexinas (*GJB2, GJB3* y *GJB6*), etcétera. El último gen de sordera identificado es el gen *GJB6,* que codifica para la conexina 30, publicado recientemente por nuestro grupo.

A pesar de la elevada heterogeneidad genética, sólo dos genes contribuyen a la mayoría de los casos de sordera hereditaria. Se atribuye, en buena medida, al gen *GJB2* (conexina 26) la sordera no sindrómica congénita en la población mediterránea. La principal causa de sordera progresiva, de aparición en edad adulta, es la mutación del ADN mitocondrial A1555G.

Las conexinas son las piezas encargadas de la formación de las unio-

PROTEINA	GEN	LOCUS
Factores de transcripción		
POU3F4	*POU3F4*	DFN3
POU4F3	*POU4F3*	DFNA15
Proteínas musculares		
Myosina VIIA	*MYO7A*	DFNB2, DFNA11
Myosina XV	*MYO15*	DFNB3
Proteínas de la unión en hendidura		
Conexina 26	*GJB2*	DFNA3, DFNB1
Conexina 31	*GJB3*	DFNA2
Conexina 30	*GJB6*	DFNA3
Forminas		
Diaphanous	HDIA1	DFNA1
Transportadores		
Pendrina	*PDS*	DFNB4
KCNQ4	*KCNQ4*	DFNA2
Proteínas de la matriz		
∝-tectonina	TECTA	DFNA8, DFNB12
Proteínas de función desconocida		
COCH	*COCH*	DFNA9
DFNA5	*DFNA5*	DFNA5
Otoferlina	*OTOF*	DFNB9

1. Genes y proteínas relacionados con la sordera



2. Mapa del genoma relativo a los genes responsables de sordera no sindrómica. DFNA, sordera de herencia dominante; DFNB sordera de herencia recesiva; DFN, sordera de herencia ligada al sexo. En rojo se indican los loci cuyos genes de sordera se han identificado

nes en hendidura (*gap junctions*), unos canales de la membrana a través de los cuales se realiza un transporte casi instantáneo de moléculas pequeñas entre las dos células. Se ha demostrado que la conexina 26 se aloja en las células epiteliales y conectivas del oído interno, y se ha postulado que estos canales intervienen en el reciclaje del potasio de la endolinfa, necesario para la transmisión de la señal nerviosa auditiva.

La mutación más frecuente en el gen de la conexina 26 estriba en la deleción de un nucleótido, 35delG, que crea una proteína truncada no funcional. En España, una de cada 40 personas es portadora asintomática de esta mutación 35delG; en Italia, una de cada 25. Otras mutaciones en el gen de la conexina 26 también causan la deficiencia.

Una elevada proporción (cerca del 50 %) de los casos familiares de sordera de aparición tardía y hasta el 95 % de los casos de herencia materna resultan de la mutación A1555G. Esta mutación se encuentra en el ARN ribosómico 12S del ADN mitocondrial. El genoma mitocondrial es de transmisión exclusivamente materna. Existe una notable relación entre la sordera debida al tratamiento con fármacos ototóxicos, principalmente antibióticos del tipo aminoglucósidos y la presencia de esta mutación.

La ototoxicidad causada por los aminoglucósidos se conoce desde hace más de 20 años. El 25 % de personas que reciben estos antibióticos desarrollan sordera. Hay una relación directa entre la mutación A1555G y la presencia de sordera después del tratamiento con aminoglucósidos. Se ha calculado que la probabilidad de que una persona con la mutación A1555G desarrolle sordera a la edad de 30 años es del 95 % si se trata con antibióticos y del 40 % si no recibe tratamiento. Otros factores, ambientales o genéticos, podrían contribuir al desarrollo de la minusvalía o actuar como factores protectores contra la sordera en presencia de la mutación A1555G.

La identificación de los genes relacionados con la sordera abre el camino para el diagnóstico de las familias afectadas, incluido el diagnóstico precoz y prenatal. En el caso de la mutación A1555G, el diagnóstico puede ser muy importante desde el punto de vista de la prevención, pues evitando el tratamiento con aminoglucósidos en pacientes con esta mutación se puede retrasar o incluso evitar el desarrollo de la sordera.

La identificación de los genes implicados permite iniciar estudios para el desarrollo de modelos animales en los que realizar experimentos de terapia génica. La investigación sobre la genética de la sordera promete para los próximos años avances espectaculares en el ámbito del conocimiento, la prevención y el tratamiento.

Núria López Bigas,
Raquel Rabionet
y Xavier Estivill
Centro de Genética Médica
y Molecular
Instituto de Investigación
Oncológica, Barcelona

PERFILES

Kate Wong

OLGA SOFFER: Traje nuevo para el hombre de las cavernas

PARIS— Paseando por la exposición sobre la evolución humana en el Musée de l'Homme, a Olga Soffer le chirrían dos cosas: se representan hombres pero se excluyen las mujeres, y visten una indumentaria impropia. Sólo alguien que nunca haya cosido concluiría que esta aguja podría haber perforado cueros, declara, haciendo que me fije en una delicada fíbula de hueso en una de las vitrinas. Más bien, asegura la arqueóloga de la Universidad de Illinois y doctora honoris causa por la Academia Rusa de Ciencias, debió servir para zurcir materiales mucho más finos, incluso algo parecido al lino de su traje de raya diplomática.

Tales agujas —hay algunas que datan de hace más de 25.000 años, de la época del Paleolítico superior— insinúan vagamente que las prendas de los hombres de las cavernas eran más variadas que las toscas combinaciones de pieles de animal que se imaginan muchos de sus colegas. Los afanes de Soffer están poniendo de manifiesto el refinamiento de esos primeros modistos. Escarbando en los registros arqueológicos en busca de trazas de bienes perecederos, como el tejido, ha descubierto indicios de actividades insospechadas en los hombres —y mujeres— de la edad del Hielo, forzando una nueva evaluación del arquetipo hombre-con-pieles-que-caza-grandes-piezas prevalente en la reconstrucción de la vida prehistórica. El tejido de sus vidas, al parecer, era mucho más exuberante de lo que hasta ahora se pensaba.

La pasión de Soffer por la moda precede a su interés por el Paleolítico. Tras licenciarse en el Colegio Hunter, donde estudió ciencias políticas, se matriculó en un programa de formación para ejecutivos con la Confederación de Grandes Almacenes de la Ciudad de Nueva York (que poseen hoy Macy's, Bloomingdale's y otros más). Eso le llevó a una actividad de 10 años en la promoción de la moda, lo cual, dice, le fue bien al principio, pero acabó por cansarle cuando iba para cumplir los 30. "Empecé a hacer novillos", recuerda entre risas. "Tenía que ir a los pases de moda, pero me escapaba a la biblioteca."

Como sustento intelectual, decidió matricularse en unos cursos nocturnos de arte. En un par de años pasó desde Picasso hasta la manera de vivir prehistórica, a través del arte prehistórico, y concluyó que "con las mismas" podría obtener un título en arqueología. Entonces, tras ausentarse de su trabajo un verano para ir a Francia "a aprender a excavar", optó por inscribirse en los cursos doctorado de la Universidad municipal de Nueva York mientras continuaba trabajando a tiempo parcial en la moda durante los dos primeros años.

En 1977 se trasladó a Rusia, acompañada por el que era entonces su marido y su hija de seis años, para investigar sobre su tema de tesis. Rusia era un nicho abierto, recuerda, al revés que Francia, donde —según dice— "encuentras al menos dos arqueólogos por metro cuadrado". Además, su ascendencia rusa le proporcionaba la ventaja de la lengua y la sensibilidad cultural. Allí, en la estepa, cuna de los famosos abrigos paleolíticos hechos con huesos de mamut, desarrolló su interés por las prácticas de supervivencia prehistórica. Y comenzó a preguntarse si los conceptos difundidos sobre el asunto no andarían errados.

"Tenemos un triste reato de ideas fijas sobre la prehistoria", se lamenta. Tómese, por ejemplo, esa persistente escena popular, la caza del mamut. Ella no lo acepta sin más. No se sabe de ningún grupo actual o reciente de cazadores-recolectores que viva de los elefantes, señala. Al igual que los elefantes, los mamuts son animales peligrosos, y las refriegas que requiere la caza con azagayas habría conllevado demasiados riesgos. ¿Qué hay entonces de esos mon-



1. Olga Soffer: entendida de la moda que se pasó a la arqueología

tajes de huesos de mamut en Rusia y en otras partes de Europa oriental y central? En los mismos yacimientos se han extraído los restos de numerosos animales, como conejos y marmotas. "Si tuvieran toda esa carne de mamut, ¿por qué regla de tres estarían cazando *gazapos*?", se pregunta. Una explicación más plausible para la mayoría de los huesos de mamut es que la gente recogía del campo los procedentes de animales que murieron por otras causas. Concluye que los mamuts y otras piezas de caza mayor eran ocasionales y no constituían el plato principal de su dieta.

Y por lo que hace a la caza de esos pequeños animales, Soffer sospecha que no se hacía con venablos. Con James M. Adovasio, del Colegio Mercyhurst, ha identificado la impronta de mallas en fragmentos de arcilla procedentes de yacimientos del Paleolítico superior de Moravia y Rusia que abren una intrigante posibilidad: la caza con redes. Las descripciones etnográficas de esta práctica, explica Soffer, revelan que "no se necesita ser un cazador fuerte, fornido y habilidoso. Un chico sin experiencia, una mujer con niños pequeños, etcétera, pueden participar y ayudar en este tipo de caza comunal. No exige la confrontación y es relativamente segura".

Las improntas de mallas y otros materiales perecederos proporcionan algunas de las primeras revelaciones sobre las vidas de mujeres, niños y viejos de la prehistoria, es decir, por emplear los términos de Soffer, de la mayoría silenciosa. Mientras que las actividades de los hombres en la flor de la edad en el seno de las culturas de cazadores-recolectores suelen implicar la manipulación de materiales duraderos, las de mujeres, niños y ancianos están asociadas a los perecederos. Como resultado, los registros arqueológicos han preservado de preferencia los restos del comportamiento característico de hombres jóvenes.

Los afanes de Soffer, sin embargo, han demostrado que sí se pueden recobrar restos de lo que hacía esa otra gente. Durante estos últimos años, ella y sus colegas han identificado toda clase de manufacturas de fibras vegetales —improntas de cuerdas, tejidos, canastas— procedentes de yacimientos del Paleolítico superior diseminados por toda Europa. Y la investigación llevada a cabo en 1999 indica que algunos objetos de hueso y de asta que se creían útiles de caza constituyen, en realidad, enseres empleados para fabricar esos bienes perecederos: calibres para redes o tablillas para tejer, por ejemplo.



2. Vestidos de Venus. Las mujeres de la edad del Hielo tenían tejidos, como se ve en las estatuillas de venus que datan de hace 27.000 años. Un molde de la Venus de Willendorf de Austria (derecha) *muestra un gorro de punto; la rusa de Kostenki* (izquierda) *exhibe un tocado similar y unas estolas gemelas*

Aunque se conocen restos de objetos perecederos de hace 13.000 años, procedentes de los antiguos pobladores de América, estos materiales del Paleolítico superior hacen retroceder la fecha de las técnicas de tratamiento de vegetales más antiguas conocidas en miles de años. Con todo, siguen siendo demasiado avanzadas para representar el origen de tales prácticas. En efecto, la más básica de esas técnicas —el trenzado de cuerdas— data probablemente de hace 60.000 años al menos, de cuando los primeros colonizadores de Australia, de quienes muchos investigadores sospechan que se hicieron a la mar desde el sudeste asiático. Considerando la limitada disponibilidad de tendones animales en esa región, apostilla Soffer, sus balsas se habrían ensamblado con cuerdas de fibras vegetales.

La mayoría de las asombrosas observaciones de Soffer han sido realizadas en piezas arqueológicas descubiertas hace mucho. Pero hasta ahora nadie se había dado cuenta. Eso es porque no lo estaban buscando, asegura. "Si se examinan desde este otra óptica, los materiales que siempre habían estado ahí comienzan a cobrar realce, como el hecho de que las estatuillas de las venus están vestidas. Pero por Dios, si llevan *ropa*." Aunque esas voluptuosas tallas de yacimientos del Paleolítico superior de toda Europa se conocen desde hace decenios, la mayoría de los especialistas habían pasado por alto sus atavíos. ¿Cómo es posible? "Porque lamentablemente muchos de los que estudiaron estas cosas eran hombres que examinaron otras variables con una carga emocional mucho mayor: los caracteres sexuales secundarios", subraya sin ambages Soffer. "Cuando empezamos a examinar ese conjunto de aspectos como arqueólogos, tomando en cuenta todas las variables y las formas que adquieren esas variables —aparte de los pechos y los traseros— ¡quién lo iba a decir!, aparecen todas estas otras cosas."

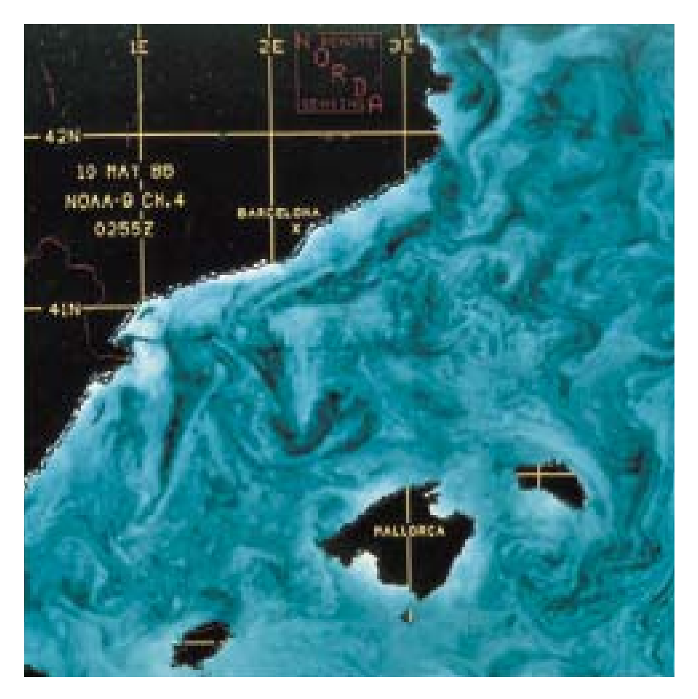
Las otras cosas, al parecer, incluyen un imponente conjunto de atuendos rituales: la famosa Venus de Willendorf de Austria lleva un gorro de punto (antes se interpretaba como un peinado con rizos); la francesa Venus de Lespugue luce una banda a modo de falda; otras venus exhiben cintas en el pelo, redecillas, fajines y cinturones. Una inspección más detallada de las tallas revela que todas esas representaciones de atuendos simbolizan objetos de origen vegetal, por oposición a los vestidos de pieles animales, favoreciendo aún más la causa de la primitiva aparición de los textiles.

Estas representaciones paleolíticas de mujeres contrastan abiertamente con las pocas representaciones masculinas conocidas, ninguna de las cuales muestra ropajes. Puede que nunca lleguemos a saber si estas misteriosas figurillas representan símbolos sexuales, diosas de la fertilidad o alguna otra entidad. Mas para Soffer, el hecho de que los antiguos artistas se tomaran tal trabajo para inmortalizar sus atuendos ilustra la importancia de los artículos perecederos. Y si los vestigios etnográficos sobre los bienes perecederos sirven de indicación, las manufacturas fueron probablemente realizadas por mujeres. "Las mujeres no estaban ahí sólo para parir", insiste Soffer. "Intervenían en la producción, al igual que las mujeres de todas y cada una de las sociedades que conocemos."

De cerca

Texto y fotos: Josep M.ª Gili, Francesc Pagès y Jordi Font

La superficie del mar labrada



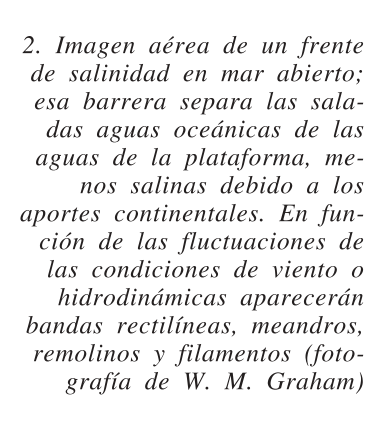
1. Imagen infrarroja de satélite donde se puede ver dibujada sobre la superficie del mar la corriente Catalana, continuación de la corriente Liguro-Provenzal que circula, en sentido contrario a las agujas del reloj, por todo el Mediterráneo noroccidental desde el mar de Liguria hasta el canal de Ibiza. (Imagen AVHRR-NOAA procesada por Paul La Violette, NORDA, USA)

Desde la playa, la superficie del mar se nos ofrece en un intenso azulverdoso, monótono. A no ser que el viento levante oleaje. También cambia su tono cuando la franja de agua cercana a la orilla se halla muy cargada de partículas finas de sedimento; esa lengua turbia adquiere un color marrón o más oscuro que el de las aguas que se distinguen un poco más lejos, aparentemente más limpias.

Lo cierto es que la superficie del mar no es uniforme. En ella pueden observarse toda una serie de fenómenos hidrográficos que resultan imprescindibles para comprender la dinámica marina y la producción biológica asociada.

En una visión a gran escala, desde un satélite se distinguen las corrientes marinas, con los remolinos y frentes que producen en las capas de agua superficiales. Se expresan a través de franjas, círculos o manchas de color y rugosidad diferentes. En esas zonas de confluencia de masas de agua distintas encontramos las áreas marinas de mayor producción biológica.

Cuando sopla el viento en una dirección a una velocidad moderada, el mar se riza con bandas longitudinales y paralelas. La formación de bandas es indicadora de la presencia de células de circulación de Langmuir. La fricción causada por el viento provoca un movimiento circulatorio ascendente de las aguas superficiales, perpendicular a la dirección del aire, engendrando una serie consecutiva de convergencias y divergencias de agua. En aguas templadas, el plancton se concentra en las zonas de convergencia y confieren a estas zonas una tonalidad característica.





2. Imagen aérea de un frente de salinidad en mar abierto; esa barrera separa las saladas aguas oceánicas de las aguas de la plataforma, menos salinas debido a los aportes continentales. En función de las fluctuaciones de las condiciones de viento o hidrodinámicas aparecerán bandas rectilíneas, meandros, remolinos y filamentos (fotografía de W. M. Graham)

3. En las regiones marinas muy productivas, así las de afloramiento, encontramos aguas cargadas con nutrientes orgánicos y más frías que las de su entorno. En el momento de máximo afloramiento, vemos, cerca de la costa, aguas de distintos colores y tonos, separados por una franja o frente. Aquí, la región del afloramiento de Benguela (Sudáfrica)





4. En el océano Antártico, las agregaciones en la superficie del mar son de hielo en formación que dan lugar a fenómenos aún poco conocidos. Las bandas, de una anchura incluso de 4 metros y separadas a intervalos de unos 25 metros, pueden alcanzar más de un kilómetro de longitud. Cuando el viento amaine, las bandas se acercarán, consolidarán y engendrarán masas de hielo que con el tiempo formarán la banquisa

El polvo estelar

J. Mayo Greenberg

Los granos de polvo que vagan por el espacio interestelar han transformado de raíz la historia de nuestra galaxia

1. LA NEBULOSA DEL CABALLO (*izquierda*) es una nube inmensa de gas y polvo en la constelación de Orión, aproximadamente a unos 1000 años-luz de la Tierra. La estrella brillante de la página precedente es Zeta Orionis, la estrella más al este del cinturón de Orión.

Mirando al cielo una noche clara se observan manchas oscuras en la Vía Láctea, la banda borrosa de luz generada por las miles de millones de estrellas de nuestra galaxia. Sir William Herschel, astrónomo inglés del siglo XVIII, pensaba que se trataba, literalmente, de "huecos en el cielo", espacios vacíos del firmamento. A principios del siglo XX, los astrónomos descubrieron que esas manchas oscuras eran, en realidad, nubes gigantescas de polvo que oscurecen la luz de las estrellas que hay detrás. Las partículas del polvo cósmico son diminutas: inferiores a una centésima del tamaño de las partículas que se limpian con una bayeta. Y sin embargo, estas partículas pequeñas han influido de un modo notable en la evolución de nuestra galaxia y en la formación de las estrellas del universo entero.

Hasta mediados del siglo pasado muchos astrónomos no veían en el polvo más que una molestia que les impedía observar las estrellas lejanas. Las cosas cambiaron en los últimos años, cuando empezaron a abordarse los granos del polvo interestelar midiendo su distribución y su composición química con telescopios instalados en tierra y en el espacio. La avalancha de datos ha facilitado el desarrollo de una hipótesis plausible sobre la evolución del polvo estelar. Con Aigen Li, antiguo alumno mío que está realizando investigación posdoctoral en la Universidad de Princeton, he elaborado lo que llamamos modelo unificado del polvo. Aunque otros han propuesto teorías alternativas, pensamos que nuestro modelo aporta la explicación más coherente de las observaciones registradas.

En la Vía Láctea las nubes de polvo se concentran en el plano galáctico, en particular a lo largo de los bordes interiores de los brazos espirales de la galaxia. Estas zonas aparecen muy parcheadas y contienen cúmulos densos de estrellas dispersos entre las nubes de polvo. Las nubes reducen la intensidad de la luz estelar más en el azul y ultravioleta que en el rojo e infrarrojo. Por tanto, cuando los astrónomos observan a las estrellas a través del polvo, éstas aparentan ser más rojizas de lo que lo son en realidad. De forma análoga, nuestro sol "enrojece" en el horizonte porque el polvo y el gas de la atmósfera de la Tierra dispersan su luz.

Las motas mayores de polvo interestelar vienen a tener el tamaño aproximado de las partículas de humo de un cigarrillo. La curva de extinción del polvo interestelar, que facilita la reducción en la intensidad de la luz por cada longitud de onda, nos revela la existencia de tres tipos de granos. Las partículas que bloquean la luz en el espectro visible son granos alargados de casi 0,2 micras (dos diezmillonésimas de metro) de ancho y como el doble de largo. Constituyen en torno al 80 % de la masa total del polvo interestelar. Cada grano consta de un núcleo rocoso rodeado de un manto de materiales orgánicos y de hielo. La presencia de un pico en la parte ultravioleta de la curva de extinción indica la existencia de partículas menores (con un diámetro aproximado de 0,005 micras), que forman el 10 % de la masa total del polvo. Estos granos pequeños son probablemente sólidos amorfos carbonáceos que pueden contener algo de hidrógeno, aunque poco o nada de nitrógeno u oxígeno. Una tercera clase de partícula de tamaño todavía menor, de apenas 0,002 micras de diámetro, es responsable de la absorción de la luz en la región del ultravioleta lejano. Se supone que estas motas, integrantes del 10 % restante de la masa del polvo, son macromoléculas similares a los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH) que los automóviles expulsan tras la combustión.

Dado que los granos de polvo acostumbran hallarse lejos de las estrellas, suelen ser bastante fríos. Alcanzan temperaturas mínimas, de 268 grados Celsius bajo cero, o lo que es lo mismo, apenas 5 grados por encima del cero absoluto. En los años cuarenta, Henk van de Hulst (astrónomo reputado y mi maestro) especulaba que algunos de los átomos que existen en el espacio interestelar —hidrógeno, oxígeno, carbono y nitrógeno— se adherirían a las superficies gélidas de los granos de polvo formando mantos de agua, metano y amoníaco helados. Andando el tiempo, bauticé esta teoría como el modelo del "hielo sucio".

Hasta principios de los años setenta, sin embargo, no se obtuvieron pruebas sólidas que respaldasen la idea. Estudiando los espectros infrarrojos de la luz de las estrellas al atravesar las nubes de polvo interestelar, los astrónomos detectaron las líneas de absorción características de los silicatos (compuestos de silicio, magnesio y hierro). De silicatos se componen los núcleos rocosos de los granos de polvo. Por las mismas fechas los astrónomos distinguieron también la línea de absorción del agua helada en los espectros infrarrojos. Las observaciones posteriores abonaron la presencia de monóxido de carbono, dióxido de carbono, formaldehído y muchos otros compuestos; se trata de sustancias volátiles, que se congelan, pues, al contacto con los granos fríos de polvo y se evaporan fácilmente si éstos se calientan. Por contra, las sustancias del interior de los granos, refractarias, permanecen sólidas incluso a altas temperaturas.

El polvo interestelar constituye aproximadamente la milésima parte de la masa de la Vía Láctea, cantidad que centuplica probablemente la masa total de todos los planetas de la galaxia. Las partículas se hallan muy dispersas: en promedio espacial, la densidad viene a ser de un grano de polvo por cada millón de metros cúbicos. Ahora bien, dado que la luz de las estrellas viaja a través de miles de años-luz de polvo, basta esa dispersión tan sutil para extinguir la radiación. Pero, ¿cómo pudo nuestra galaxia adquirir tanto polvo?

EL POLVO DE NUESTRA GALAXIA

Las nubes de polvo, así las que se observan en la Nebulosa Rosetta (*abajo*), incuban estrellas. Los granos de polvo bloquean la radiación en el interior de las nubes gaseosas, haciendo que éstas se desplomen más fácilmente para formar estrellas. En el proceso, la mayor parte del



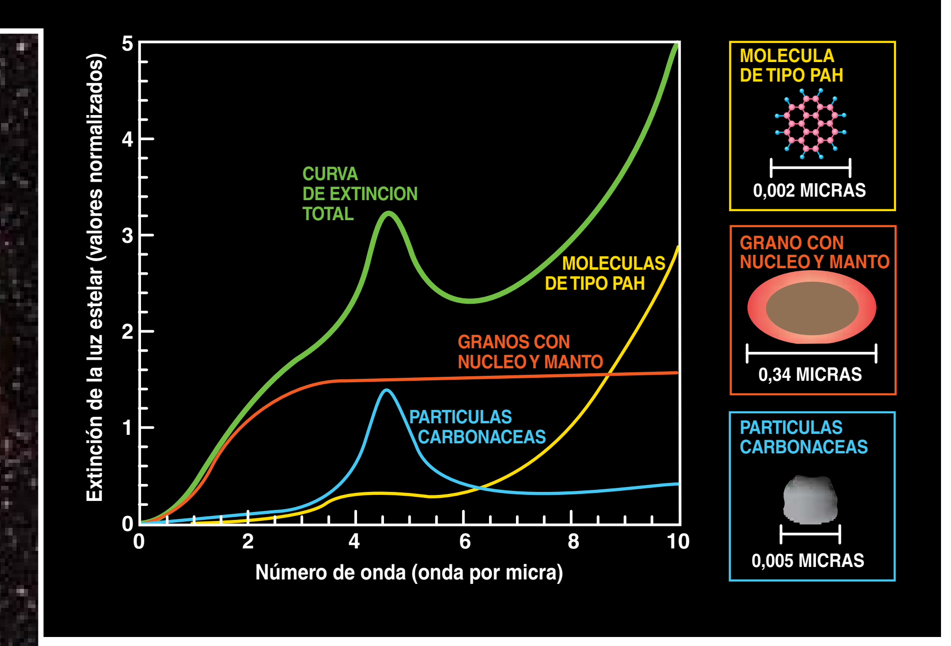
Del polvo al polvo

En la primera etapa del universo, hace unos 15.000 millones de años, no había polvo. Como todas las demás galaxias primigenias, la Vía Láctea estaba formada sólo de hidrógeno, helio y algo de otros elementos ligeros originados en la gran explosión (*big bang*). Durante ese período, las mayores nubes de helio e hidrógeno eran las únicas capaces de contraerse para engendrar estrellas, pues se requiere una intensa fuerza de atracción gravitatoria para compensar la presión producida por los movimientos termodinámicos de los gases. Nuestra galaxia estaba, en consecuencia, poblada de estrellas gigantescas de tipo O y B, que explotaron como supernovas apenas unos pocos millones de años después de su nacimiento. La primera remesa de polvo surgió de tales explosiones; los astrónomos observan rastros de ello en las galaxias primigenias detectadas en el infrarrojo lejano por telescopios que ven longitudes de onda submilimétricas. Pero este polvo no sobrevivió mucho tiempo en el medio interestelar; las ondas de choque de otras supernovas que se sucedieron destrozaron las partículas al poco de crearse.

Transcurridos unos 5000 millones de años, sin embargo, cesó la tormenta de supernovas. Las estrellas, de masa mediana, entraron en la fase de gigantes rojas. A medida que estas estrellas se enfriaban y expandían, en las atmósferas se formaban partículas rocosas de silicatos y salían despedidas al espacio interestelar. Algunas de estas partículas de silicatos penetraron en las nubes de gas molecular que circulan sin cesar entre las estrellas. Sometidos a las bajas temperaturas de estas nubes, cada átomo o molécula que se encontraba con un grano de silicato se congelaba en su superficie, a la manera en que las gotas de vapor de agua se congelan sobre un cristal muy frío. Y así crecía un manto helado sobre cada uno de los núcleos de silicatos.

Al paso que el polvo se concentraba en las nubes moleculares, la densidad de los granos en el interior de éstas se hizo decenas de miles de veces más alta que en su exterior. El polvo adquirió consistencia suficiente para bloquear casi toda la radiación que entraba en las nubes, con

polvo es expulsado hacia regiones más vacías del espacio. La medición de la extinción de la luz estelar en tales regiones difusas (*abajo*) da fe de la presencia de tres tipos de partículas de polvo: los granos con núcleo y manto, los sólidos amorfos carbonáceos y las moléculas de mayor tamaño similares a los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH). Los granos dotados de núcleo y manto explican también la polarización observada en la luz de las estrellas en todas las longitudes de onda.



J. MAYO GREENBERG se doctoró en física teórica por la Universidad Johns Hopkins en 1948. Fue contratado por la Universidad de Leiden en 1975 para crear y dirigir el laboratorio de astrofísica, donde ha venido investigando sobre evolución química del polvo interestelar, composición de los cometas y origen de la vida.

el descenso consiguiente de la temperatura del gas. Enfriadas las nubes, dejó de exigirse una masa notable para superar a la presión del gas. Por tanto, se contrajeron también las nubes pequeñas de gas y surgieron estrellas de menor tamaño como nuestro Sol. Al relajarse las restricciones de la formación estelar, la presencia del polvo cambió de raíz la estructura de la Vía Láctea.

Es más, el polvo de nuestra galaxia está en continua renovación. Cuando una nube densa de gas y polvo se contrae para formar una estrella, se evaporan los granos de polvo más próximos a la región del nacimiento de la estrella. (El silicio y otros elementos de estos granos se integran en la estrella o se condensan más tarde para constituir los planetas rocosos y los asteroides.) Pero en su mayor parte el polvo se expulsa hacia nubes difusas, regiones del espacio donde el gas es mucho menos denso. En ese entorno más agresivo, los recubrimientos de hielo de los granos no sólo dejan de crecer, sino que acaban destruidos o erosionados por la radiación ultravioleta, colisiones con otras partículas y frentes de choque de supernovas.

Con todo, los granos no quedan desnudos en sus núcleos de silicatos. Por debajo de la funda exterior de hielo existe una capa interna de materiales orgánicos complejos.

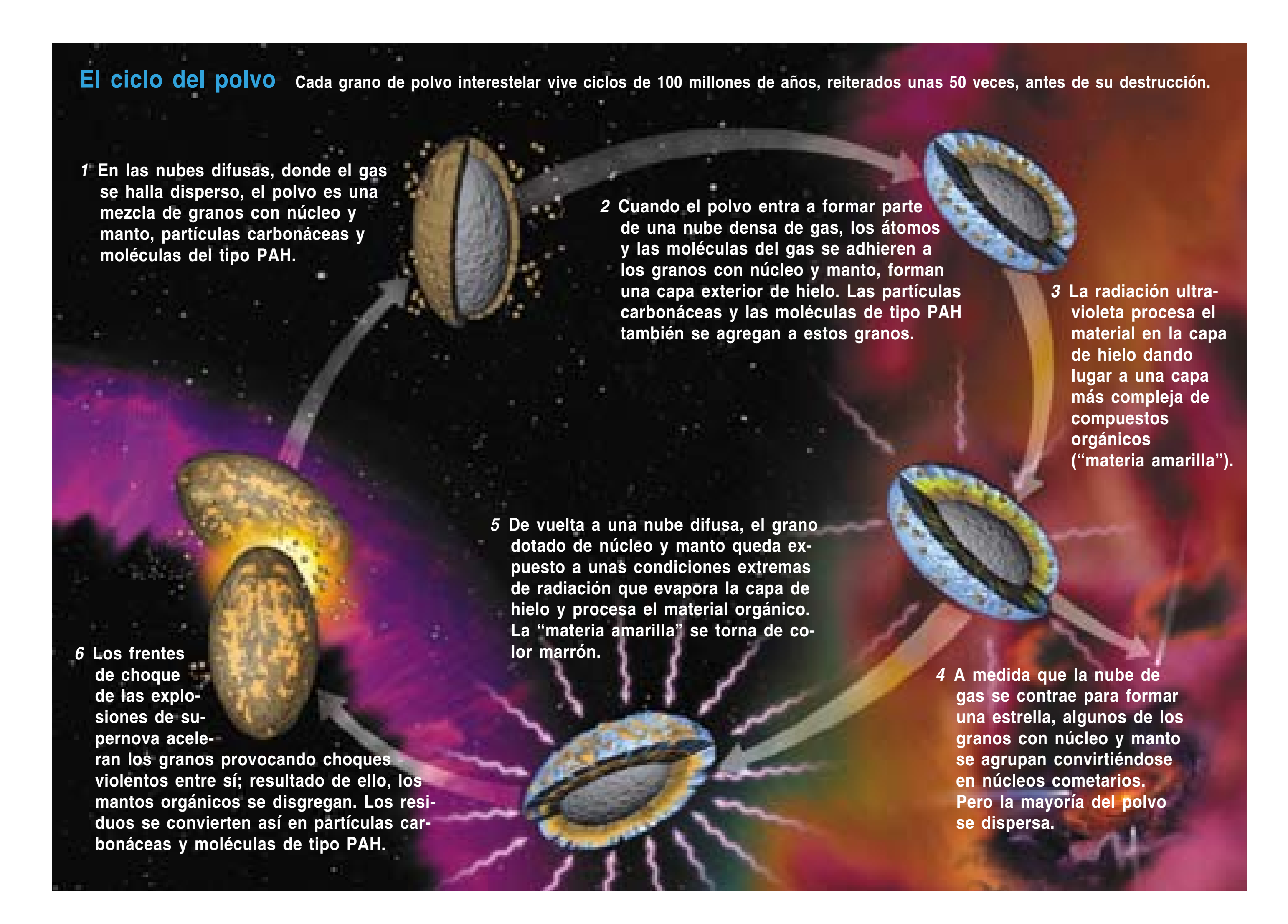
Hace 30 años propuse la existencia de este manto de materia orgánica. Me basaba en la determinación de que los silicatos, por sí solos, no podían explicar la cantidad de luz extinguida como consecuencia del polvo de nubes difusas. Entendía que la capa de material rico en carbono sobre el grano de polvo se producía por reacciones químicas desarrolladas en el manto de hielo e iniciadas cuando el grano se hallaba aún en la nube densa de gas molecular. Según mi teoría, cuando los fotones ultravioleta de alta energía golpean el manto de hielo, rompen las moléculas de agua, de metano y de amoníaco y originan radicales libres, que luego se recombinan para crear moléculas orgánicas como el formaldehído. Una irradiación ultravioleta continuada provoca con el tiempo la formación de compuestos orgánicos más complejos, los llamados de primera generación. Permanecen como un residuo sobre el núcleo de silicatos incluso después de que el grano de polvo haya abandonado la nube molecular y se haya destrozado el manto de hielo. De hecho, la capa orgánica ayuda a proteger el núcleo de silicatos de las explosiones de supernova, preservando el grano de polvo hasta que éste regrese de nuevo a otra nube densa de gas.

Materia amarilla, materia marrón

Para someter a prueba mi tesis, emprendí unos experimentos en el laboratorio que simulaban las condiciones que afectan a los mantos de hielo. El trabajo, comenzado en 1970 en la Universidad estatal de Nueva York en Albany, prosiguió, desde 1975, en la Universidad de Leiden. Nuestro grupo de investigación expuso varias mezclas de hielo a la acción de la radiación ultravioleta a una temperatura de 263 grados Celsius bajo cero, calentando posteriormente la mezcla. Obtuvimos un residuo de color amarillento. Esa "materia amarilla", así la llamamos, contenía glicerol, gliceramida, varios aminoácidos (entre ellos, glicina, serina y alanina) y una cohorte de otras moléculas complejas.

Más o menos al mismo tiempo, los astrónomos detectaban rastros de la existencia de compuestos orgánicos en el polvo de las nubes difusas, midiendo la absorción de la luz estelar que las atraviesa. En nuestro laboratorio los resultados no duplicaban exactamente las líneas de absorción de los espectros infrarrojos, pero tal discrepancia no debía sorprendernos. En el entorno de las nubes difusas los granos se encuentran expuestos a una radiación ultravioleta 10.000 veces más intensa que en las nubes moleculares. Esta radiación transforma la materia de las capas internas en materia orgánica de segunda generación. Semejante cantidad extra de procesamiento ultravioleta era difícil de reproducir en el laboratorio.

Una afortunada oportunidad llamó a nuestra puerta. A finales de los



años ochenta, Gerda Horneck, de la Agencia Espacial Alemana (DLR), nos invitó a utilizar la plataforma espacial que se había diseñado en un comienzo para exponer especímenes biológicos a la acción de la radiación ultravioleta de larga duración (de donde su nombre *Exobiology Radiation Assembly*). Se trataba de una estación ideal para el procesamiento ultravioleta de la "materia amarilla". Menno de Groot, Celia Mendoza Gómez, Willem Schutte y Peter Weber, integrantes de nuestro grupo de investigación, prepararon los residuos orgánicos y los enviamos al espacio con el satélite EURECA (*European Retrievable Carrier*), puesto en órbita con la lanzadera espacial en 1992.

Después de un año (aunque sólo fueron cuatro los meses de exposición a la radiación ultravioleta solar), la lanzadera recogió el satélite. Cuando recibimos las muestras, lo que se había enviado de color amarillo regresó de color marrón. Este cambio de color indicaba que la materia se había enriquecido en carbono. Nos pusimos a estudiar la "materia marrón" con un espectrómetro infrarrojo; aparecía el mismo modelo de líneas de absorción que el encontrado en las observaciones infrarrojas del polvo interestelar. Y aunque la exposición de la muestra fue sólo de una décima parte de la máxima exposición a la que está sometido un grano de polvo en una nube difusa, nuestra muestra se aproximaba bastante a la materia refractaria del polvo cósmico.

En esa gavilla de experimentos nos hemos basado Aigen Li y yo para idear el modelo unificado del polvo. La teoría postula que los dos tipos pequeños de granos de polvo interestelar —las partículas amorfas carbonáceas y las moléculas similares a los PAH— surgen del procesado ultravioleta de los materiales orgánicos en los granos mayores con núcleo y manto. Llevamos la muestra de "materia marrón" a Seb Gillette, de la Universidad de Stanford, para su análisis mediante las avanzadas técnicas de espectrografía de masas desarrolladas por Richard Zare, de Stanford. Gillette encontró que la muestra era muy rica en PAH. El modelo unificado del polvo sugiere que el procesado químico de los granos con núcleo y manto da cuenta de casi todas las partículas carbonáceas pequeñas y las moléculas de tipo PAH en el polvo interestelar. En las nubes de gas difusas, las partículas pequeñas se originan de los mantos orgánicos cuando una explosión de supernova hace añicos los granos mayores. Cada partícula dotada de núcleo y manto produce un enjambre de cientos de miles de granos minúsculos.

Con el tiempo, otra nube molecular densa captura de nuevo el enjambre de polvo. Dentro de la nube, menudean los choques entre las partículas de polvo y los átomos y moléculas del gas. Transcurrido en torno al millón de años, las partículas mayores adquieren una capa de hielo dominado por agua helada y monóxido de carbono. Las observaciones del polvo en las nubes muy densas alrededor

de las estrellas han descubierto la presencia de esos compuestos, así como cantidades pequeñas de dióxido de carbono, formaldehído y amoníaco. Aunque nadie ha visto directamente qué ocurre con las partículas carbonáceas y las moléculas PAH en una nube molecular, parece inevitable que éstas se adhieran también a los granos mayores y formen parte de los mantos helados. Reprocesadas entonces las moléculas orgánicas por la radiación ultravioleta, el ciclo comienza de nuevo.

Se han propuesto modelos alternativos al nuestro que pueden explicar los efectos de extinción del polvo interestelar sin la necesidad de los mantos orgánicos en los granos mayores. Así, John S. Mathis, de la Universidad de Winsconsin en Madison, sostiene que los granos mayores son agregados porosos de partículas pequeñas de grafito y silicatos. Pero estos modelos no pueden explicar con precisión otro efecto de la extinción interestelar: la polarización de la luz que atraviesa una nube, con la orientación de las ondas electromagnéticas en una dirección determinada. Para explicar el fenómeno nosotros sabemos que cada grano grande de polvo debe tener una forma casi cilíndrica o esferoidal y girar alrededor de su eje más corto. Sabemos, además, que los ejes de giro de todos los granos de polvo han de apuntar en la misma dirección para polarizar la luz. (Se cree que los campos magnéticos de la nube de polvo alinean los ejes de giro.) La potencia de nuestro modelo unificado del polvo estriba en que las hipotéticas partículas con núcleo y manto pueden explicar la polarización observada en todas las longitudes de onda.

Del polvo a los cometas

Se da por supuesto que los cometas son reliquias genuinas de la nube protosolar, nube de gas y polvo que originó nuestro sistema solar. A medida que se suceden los descubrimientos sobre la composición química de los cometas y del polvo interestelar, se hace cada vez más patente que los cometas se formaron en un comienzo como grumos de granos de polvo. Con otras palabras, de las observaciones de los cometas extraeremos nueva información sobre el polvo.

Cuando los planetas y los cometas nacieron con el Sol hace unos 4600 millones de años, los granos de polvo dotados de núcleo y manto de la nube protosolar habían absorbido con probabilidad a todas las partículas carbonáceas y las moléculas PAH, así como al monóxido de carbono y otros compuestos volátiles del gas. Sólo el hidrógeno y el helio permanecían libres. Los granos de polvo chocaban entre sí con la frecuencia suficiente para formar agregados grumosos de gran tamaño. De acuerdo con la teoría dominante, estos agregados amorfos evolucionaron en lo que serían los núcleos de los cometas. Cada núcleo era muy poroso; contendría, pues, bastantes huecos vacíos. Mi propio modelo de un trozo del núcleo de un cometa contiene 100 granos de polvo protosolar de tamaño promedio en un grumo de tres micras de ancho, el 80 % de cuyo volumen es espacio vacío.



2. MODELO PARA EL POLVO COMETARIO diseñado por el autor. Representa el agrupamiento de 100 granos dotados de núcleo y manto en un grumo no compacto de tres micras de ancho. Ricos en compuestos orgánicos, estos grumos podrían haber depositado las semillas de la vida sobre la Tierra.

Desde su formación, los cometas han estado en órbita alrededor del Sol en las regiones de la nube de Oort y del cinturón de Kuiper, a distancias que trascienden los planetas. En ocasiones, sin embargo, las perturbaciones gravitatorias lanzan a los cometas hacia órbitas que los acercan al Sol. En 1986 se produjo una auténtica revolución en nuestro entendimiento de estos cuerpos. Las naves Giotto y Vega 1 y 2 pasaron cerca del cometa Halley, que se aproxima al Sol cada 76 años. Los tres satélites transportaban espectrómetros para medir la masa y la composición química del coma del cometa Halley, la nube de gas y polvo que rodea al núcleo. Las partículas de polvo golpeaban los detectores a 80 kilómetros por segundo y se rompían en sus componentes atómicas. Los instrumentos detectaron un amplio rango de masas, incluyendo los 10^{-14} gramos esperados para los granos de polvo con núcleo y manto y los 10^{-18} gramos típicos de las partículas carbonáceas.

Jochen Kissel, del Instituto Max Planck de Física Extraterrestre en Garching, Franz R. Krueger, de la Oficina Krueger de Ingeniería en Darmstadt, y Elmar K. Jessburger, de la Universidad de Münster, confirmaron más tarde que el polvo del cometa Halley estaba constituido por agregados de partículas con núcleos de silicatos y mantos de materia refractaria, lo que confirmaba mi teoría sobre el origen de los cometas. Su conclusión se basó en un hecho: los átomos de oxígeno, carbono y nitrógeno de las capas orgánicas golpearon los detectores de los satélites antes de que lo hicieran los átomos de silicio, magnesio y hierro de los núcleos.

¿Qué edad tiene el polvo del Halley y de otros cometas? Sabemos que, cuando el polvo se agrupó para formar los cometas, debía tener alrededor de 5000 millones de años, ya que un grano típico de polvo permanece en el espacio interestelar ese tiempo antes de ser consumido en la fase de gestación de una estrella. Y puesto que los cometas en sí mismos tienen 4600 millones de años, el polvo probablemente alcance una edad de 10.000 millones de años. Estudiando el material de los cometas podemos, por tanto, sondear la infancia de la Vía Láctea.

El polvo de los cometas puede haber incluso desempeñado una función decisiva en la aparición de la vida en la Tierra. El material que se desprende del polvo cometario no sólo encierra moléculas orgánicas, sino que resulta, además, ideal para la evolución química, una vez que se sumerge en agua. Kissel y Krueger han demostrado que las partículas pequeñas penetran con facilidad en el grano desde el exterior, pero las moléculas de mayor tamaño permanecen siempre en el interior. Se trata de una estructura propicia para la síntesis de moléculas mayores y com-

plejas que posiblemente fueron los incubadores de las primeras formas primitivas de la vida. Un simple cometa podría haber depositado hasta 10^{25} de estas "semillas" en una Tierra joven.

La Administración Nacional para la Aeronáutica y el Espacio (NASA) y la Agencia Espacial Europea (ESA) están llevando a cabo misiones espaciales que proporcionarán más información sobre la naturaleza de los cometas y del polvo interestelar. La nave de la NASA *Stardust*, lanzada en 1999, está programada para que se encuentre con el cometa Wild-2 en 2004 y regrese con una muestra del polvo de su coma. En su recorrido recogerá polvo interestelar a lo largo del sistema solar. Más ambiciosa es la misión *Rosetta* de la ESA, cuyo lanzamiento está programado para 2003; entrará en órbita alrededor del núcleo del cometa Wirtanen y enviará una sonda que aterrizará en la superficie porosa.

Un conjunto de instrumentos científicos a bordo de la sonda analizarán la estructura física de la superficie y su composición química. Mi grupo de investigación participará en la preparación de las muestras de laboratorio, que se compararán con las tomadas del núcleo y del polvo del cometa Wirtanen.

Estas misiones espaciales abrirán sin duda nuevos caminos en la investigación. Los astrónomos han dejado de considerar al polvo interestelar un engorro. Lo ven ahora como una fuente imprescindible de información sobre el nacimiento de las estrellas, los planetas y los cometas. Por no hablar de las posibilidades del polvo interestelar para descifrar el origen de la vida.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ESTRUCTURA Y EVOLUCIÓN DE LOS GRANOS INTERESTELARES. J. Mayo Greenberg en *Investigación y Ciencia*, págs. 80-91; agosto 1984.

A UNIFIED MODEL OF INTERSTELLAR DUST. Aigen Li y J. Mayo Greenberg en *Astronomy and Astrophysics*, vol. 323, n.º 2, págs. 566-584; 1997.

COSMIC DUST IN THE 21TH CENTURY. J. Mayo Greenberg y Chuanjian Shen en *Astrophysics and Space Science*, vol. 269-270/1-4, páginas 33-55; 1999. El artículo está disponible en http://arXiv.org/abs/astro-ph/0006337 en la Red.

Componentes de la enfermedad de Alzheimer

El rompecabezas bioquímico, asombrosamente complejo, que subyace bajo esta enfermedad incapacitante, sigue aún incompleto, aunque empiezan a encajar las piezas y se ven posibilidades de tratamiento

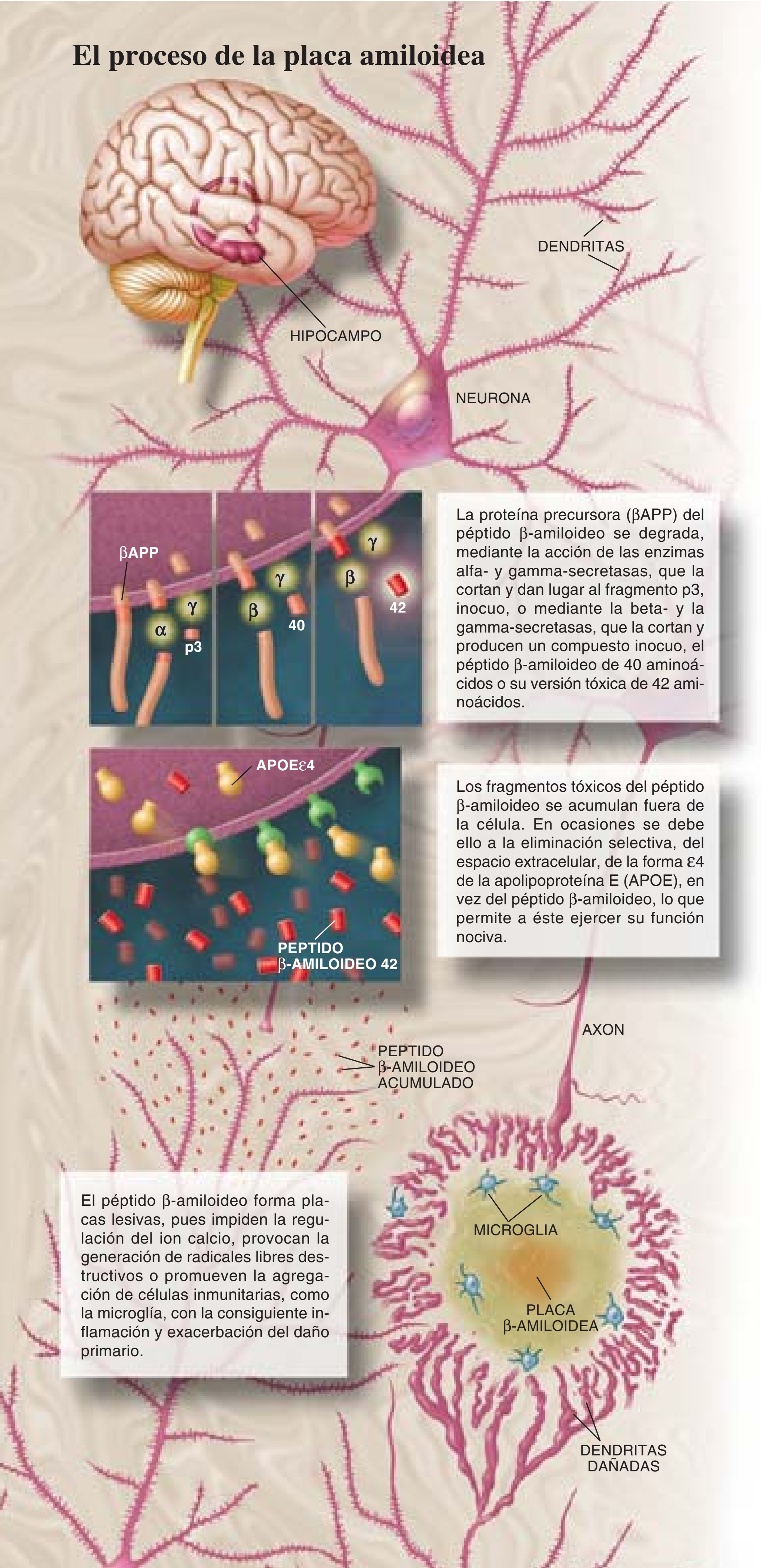
Peter H. St George-Hyslop

Muchas familias soportan la pesada carga de cuidar al padre, la madre o el abuelo profundamente incapacitados que, sólo unos años antes, eran personas activas y llenas de vitalidad. El proceso comienza con distracciones que se dirían inocentes, con preguntas repetidas dos o tres veces. Encuentra luego dificultad en seguir una conversación de cierta complejidad o pierde la capacidad de participar en algún pasatiempo que requiere cierta atención. Al principio, la familia suele atribuir estos problemas menores a la edad o a la fatiga. Pero el abuelo se torna cada vez más olvidadizo, incapaz de encontrar el camino de vuelta a casa desde la tienda de la esquina o de reconocer las caras de los seres queridos. Por último, ya no puede valerse por sí solo en la ejecución de tareas cotidianas, como bañarse o vestirse, comer o salir a dar un paseo.

En esa pincelada general aparecen retratadas varias demencias, enfermedades en las que dejan de funcionar zonas del cerebro y se producen alteraciones de la memoria, juicio, razonamiento y estabilidad emocional. Las demencias no constituyen ninguna novedad. Abundan relatos elocuentes sobre las mismas en la literatura clásica griega y en la medieval. Ocurren con mayor frecuencia en personas de edad. Y como la esperanza de vida se ha alargado de una forma notable, estas enfermedades comienzan a ser una seria preocupación sanitaria. Aproximadamente el 15 por ciento de las personas de más de 65 años desarrollan al-

1. LA RUINA física producida por la enfermedad de Alzheimer afecta a millones de personas y a sus familiares. La incidencia de esta demencia neurodegenerativa aumenta con el envejecimiento de la población mundial.





gún tipo de demencia; y si pasan de los 85, la proporción aumenta hasta el 35 por ciento.

De todas las demencias, la enfermedad de Alzheimer es la más común. Se calcula que de aquí a cinco años, sólo en Estados Unidos, habrá unos 22 millones de personas afectadas. Hasta hace poco, el conocimiento que se tenía de su etiología era harto magro y todavía carecemos de terapias preventivas o curativas. Pero el avance de la epidemiología, la genética, la biología celular o molecular permite ya identificar algunos de los mecanismos subyacentes.

Según parece, la enfermedad de Alzheimer se debe al desbarajuste en el procesamiento de ciertas proteínas, por cuya causa las células del cerebro y el espacio entre ellas se llenan de fragmentos de una proteína tóxica. Al propio tiempo, lo que no deja de ser indicativo, otras alteraciones degenerativas, así la demencia frontotemporal, la enfermedad de Parkinson y la enfermedad de Creutzfeld-Jakob, se caracterizan también por un procesamiento anormal de proteínas. De ahí que empiecen a idearse vías novedosas para tratar la enfermedad de Alzheimer y otras demencias, vías que podrían incluir el uso de vacunas por cuya acción el organismo se liberase de tales fragmentos tóxicos.

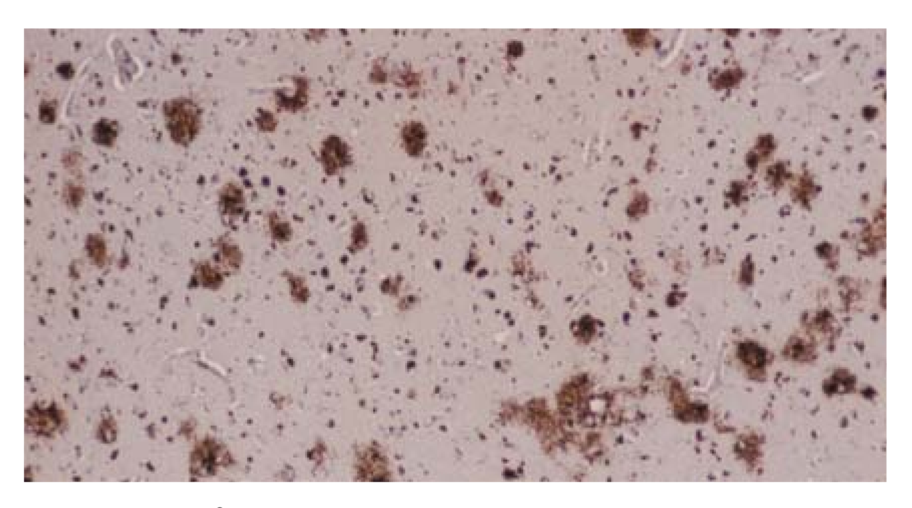
Una lectura del cerebro

Cuanto hoy sabemos de la enfermedad se lo debemos a la investigación directa sobre el cerebro de los pacientes. El examen microscópico ha revelado una pérdida de neuronas en el hipocampo, un centro de la memoria, y en la corteza cerebral, implicada en el razonamiento, la memoria, el lenguaje y otros procesos del pensamiento. Desde los años setenta se sabe que algunas de las neuronas que mueren son colinérgicas; éstas se comunican a través de la acetilcolina, neurotransmisor que al final se degrada por la acetilcolinesterasa. Para bloquear la acción de dicha enzima se recetan, desde hace diez años, tacrine y donepezil, medicinas que, al defender la integridad de la acetilcolina, frenan el desarrollo de las alteraciones en las personas que sufren los primeros estadios del Alzheimer. Por desgracia, los fármacos pierden su razón de ser una vez degeneradas las neuronas colinérgicas, incapaces ya de sintetizar el neurotransmisor.

Otros signos cerebrales manifiestos de la enfermedad son los cúmulos de proteínas. Los hay de dos tipos, según se ubiquen en el interior neuronal o en el espacio intercelular. Los cúmulos del interior, o marañas neurofibrilares, recuerdan pares de hebras arrolladas en helicoide. Analizadas en los años ochenta, se descubrió que tales marañas están formadas por la proteína tau. El interés de tau reside en su asociación a tubulina, la proteína que forma los microtúbulos, estructuras de importancia capital. A la manera de las vigas y columnas de los edificios, los microtúbulos sirven de sostén y dan forma a las células. Proporcionan también vías por donde transitan las moléculas, nutrientes incluidos, y los componentes celulares (vesículas y mitocondrias).

Las marañas de tau, sin embargo, no son privativas de la enfermedad de Alzheimer. Por esa razón, aun cuando la elevada densidad de las marañas neurofibrilares constituya un rasgo distintivo de la patología y se relacione con la gravedad de la demencia, muchos no conceden, a las alteraciones de tau, la importancia que otorgan al segundo tipo de depósitos de proteína: las placas amiloideas. (Sobre el renacido interés por tau volveremos más adelante.)

A diferencia de lo que ocurre con las marañas neurofibrilares, los depósitos de proteína amiloidea se forman en los espacios entre células nerviosas. Las neuronas vecinas suelen aparecer hinchadas y deformadas; los cúmulos de proteína —placas seniles o amiloideas— se acompañan habitualmente de células reactivas inflamatorias llamadas microglía, que son parte del sistema inmunitario del cerebro y podrían estar intentando degradar y eliminar las neuronas alteradas o quizá las placas. No sabemos si las neuronas del interior de las placas o de sus aledaños funcionan con normalidad, pues sólo existe un vínculo tenue entre la densidad de las placas y la gravedad de la demencia. Además, este tipo de placas se encuentra en la mayoría de la gente de edad. No obstante, su amplia presencia en hipocampo y corteza cerebral es específica de los enfermos de Alzheimer y se generan mucho antes que las marañas neurofibrilares.



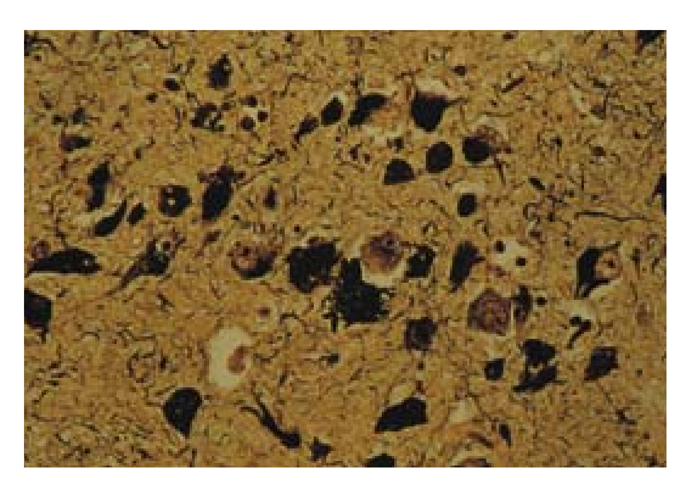
2. LAS PLACAS β-AMILOIDEAS se numeran entre los primeros signos que nos revelan la enfermedad de Alzheimer, aunque no se correlacionen con la gravedad de la demencia que experimenta el paciente. Esta imagen, obtenida con el microscopio óptico, procede de la corteza cerebral de un paciente y muestra las placas mediante densas manchas oscuras. La creación de los fragmentos tóxicos del péptido β-amiloideo que constituyen las placas comienza con el procesamiento incorrecto de la proteína precursora del péptido y culmina con la lesión de la neurona.

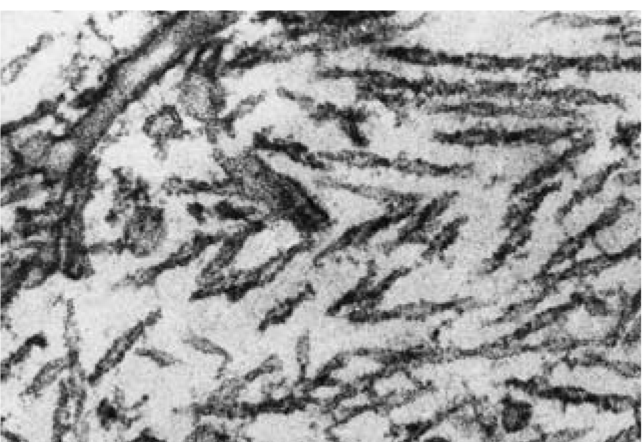
Ante la presencia precoz y la densidad elevada de las placas en la enfermedad, se pensó que el desentrañamiento de su bioquímica podría ofrecer pistas sobre la etiología. La investigación encaminada al aislamiento de los componentes de las placas tuvo su primer éxito en 1984. George G. Glenner, de la Universidad de California en San Diego, descubrió entonces que un componente principal era cierto péptido constituido por 40 o 42 aminoácidos. A esta identificación del péptido β-amiloideo, su denominación actual, siguió muy pronto la determinación de la secuencia del gen de la proteína de la que se origina el péptido: la proteína precursora del péptido β-amiloideo, o βAPP. Tales hallazgos de la bioquímica encajaban con la información coetánea aportada por la genética.

Desde 1907, año en que Alois Alzheimer, neurólogo alemán, identificó la enfermedad, los epidemiólogos se han esforzado por comprender sus pautas, es decir, si aparece en familias (los genes resultarían determinantes) o si viene promovida por el medio. En los años ochenta se comprobó la tendencia de ciertas familias a sufrir tal demencia: la enfermedad se transmitía de una generación a la siguiente, a la mitad de los hijos (lo mismo varones que mujeres) de los pacientes afectados. Indicaba ese patrón que en algunas familias la vulnerabilidad procedía de la herencia de un gen defectuoso en un cromosoma autosómico, no sexual, y sugería que el gen mutante heredado del progenitor afectado era dominante sobre el gen normal heredado del progenitor exento.

Los epidemiólogos rastrearon también la ocurrencia de la enfermedad en personas que no pertenecían a ese tipo de familias. Y han establecido que la genética no es la única causa en la población general. La enfermedad tiene promotores complejos y diversos. Sin duda, la herencia interviene en una proporción significativa de casos (la estimación varía entre el 1 y el 40 por ciento). Pero cuantos intentos se han empeñado en identificar catalizadores ambientales, que operasen solos o en conjunción con la herencia, han sido decepcionantes. Llaman la atención los escasos factores de riesgo identificados hasta la fecha, que apenas arrojan luz. Se asocia la patología a una educación pobre en la infancia, una lesión grave de la cabeza y, de una manera mucho menos definida, a la exposición al aluminio en el agua potable. La correlación, sin embargo, no significa causalidad. Pudiera su-

PETER H. ST GEORGE-HYSLOP es neurólogo y genético molecular. Iniciada su formación en la Universidad de Ottawa, completó sus estudios en la facultad de medicina de la Universidad de Harvard. En la actualidad dirige el Centro de Investigaciones de Enfermedades Neurodegenerativas de la Universidad de Toronto y la Clínica de Afecciones de la Memoria en el Toronto Western Hospital.





3. LAS MARAÑAS DE TAU aparecen en una etapa avanzada de la enfermedad y reflejan una intensa asociación con la gravedad de la demencia. Estas marañas neurofibrilares forman triángulos negros en las imágenes del microscopio óptico, a la izquierda, y filamentos helicoidales emparejados en la imagen del microscopio electrónico, a la derecha. Las marañas de tau perturban los microtúbulos de la neurona, empujándolos hacia un lado y degradando, por tanto, el transporte de nutrientes, así como la transmisión de los mensajes nerviosos.

ceder que estos factores fueran, en realidad, indicadores de otros agentes o acontecimientos. Así, una lesión en la cabeza podría reducir el número de neuronas, causando por tanto los síntomas de la enfermedad de Alzheimer, que se presentaría mucho antes de lo que, sin esa agresión, lo hubiera hecho.

El reconocimiento de componentes genéticos ha abierto un campo amplio de investigación. Cualquier hallazgo en ese dominio podría revestir un interés crucial para todos los casos. Los trastornos clínicos, neuropatológicos y bioquímicos son idénticos siempre, esté su origen genéticamente determinado o se trate de un episodio esporádico, calificativo que se aplica a las formas restantes. Ahora bien, cuando se han combinado con el descubrimiento de la composición de las placas y marañas de hebras, las ideas de la genética han impulsado experimentos valiosos. Al aislamiento del péptido β-amiloideo y al aislamiento del gen de la βAPP siguió presto el descubrimiento de que este gen se encuentra en el cromosoma 21. Casi al mismo tiempo, otros estudios indicaban que el cromosoma 21 podría llevar algún defecto en familias con Alzheimer. Por otros trabajos se sabía que los enfermos con síndrome de Down (con tres copias del cromosoma 21) presentan, casi invariablemente, rasgos de Alzheimer hacia los 40 años de edad.

¿Era el gen precursor de la proteína β-amiloidea el ámbito de mutaciones causantes de algunos casos de enfermedad de Alzheimer? Lo era. A comienzos de los años noventa, Blas Frangione y Efrat Levy, del Centro Médico de Nueva York, Alison M. Goate, de la facultad de medicina de la Universidad de Washington, Michael Mullan, de la Universidad de Florida del Sur, Lydia Hendriks y Christine Van Broeckhoven, de la de Amberes, y Harry Karlinsky y mis colaboradores, de Toronto, identificaron, en efecto, esas mutaciones en individuos con Alzheimer de tipo familiar. (Puesto que los genes contienen las instrucciones para la síntesis de proteínas, una mutación en un gen puede significar que la proteína producida será diferente, si es que llega a fabricarse. Tal disimilaridad acarrea problemas, lo mismo que sucede si sustituimos, en una máquina, la pieza propia por otra improcedente.) De repente quedaba claro que un procesamiento anormal de la βAPP o un fallo de su actividad causaba la enfermedad. Esta idea nueva espoleó los esfuerzos para determinar de qué modo la proteína se acortaba en el péptido β-amiloideo.

Aunque la función biológica precisa de la βAPP normal sigue envuelta en el misterio, sí sabemos que muchos tipos de células y tejidos producen βAPP y que contiene entre 695 y 770 aminoácidos. La proteína penetra en la membrana externa de la célula; una porción importante se introduce en el espacio extracelular. El péptido β-amiloideo se secciona del fragmento de la βAPP que se encuentra en la membrana de la célula. Sabemos también ya que, en el curso de su vida, la βAPP se corta de dos maneras posibles. De entrada, la proteína se corta por la alfa-secretasa. (A esta enzima se la llama en el argot “putativa”, porque suponemos que existe —y tenemos datos que lo corroboran—, aunque no se ha aislado todavía.) Luego la secciona otra enzima putativa, la gamma-secretasa. Estos cortes producen al final un fragmento peptídico inocuo llamado p3.

El más cruel de los cortes

Vayamos con el segundo proceso de corte. Consta también de dos pasos, y no siempre resulta tan inocuo. En una primera fase, la enzima beta-secretasa —aislada por Martin Citron y su grupo en Amgen— corta la proteína. Una de las piezas resultantes, o fragmento C99-βAPP (porque tiene 99 aminoácidos), sufre entonces un nuevo corte por la gamma-secretasa; así surge el péptido β-amiloideo.

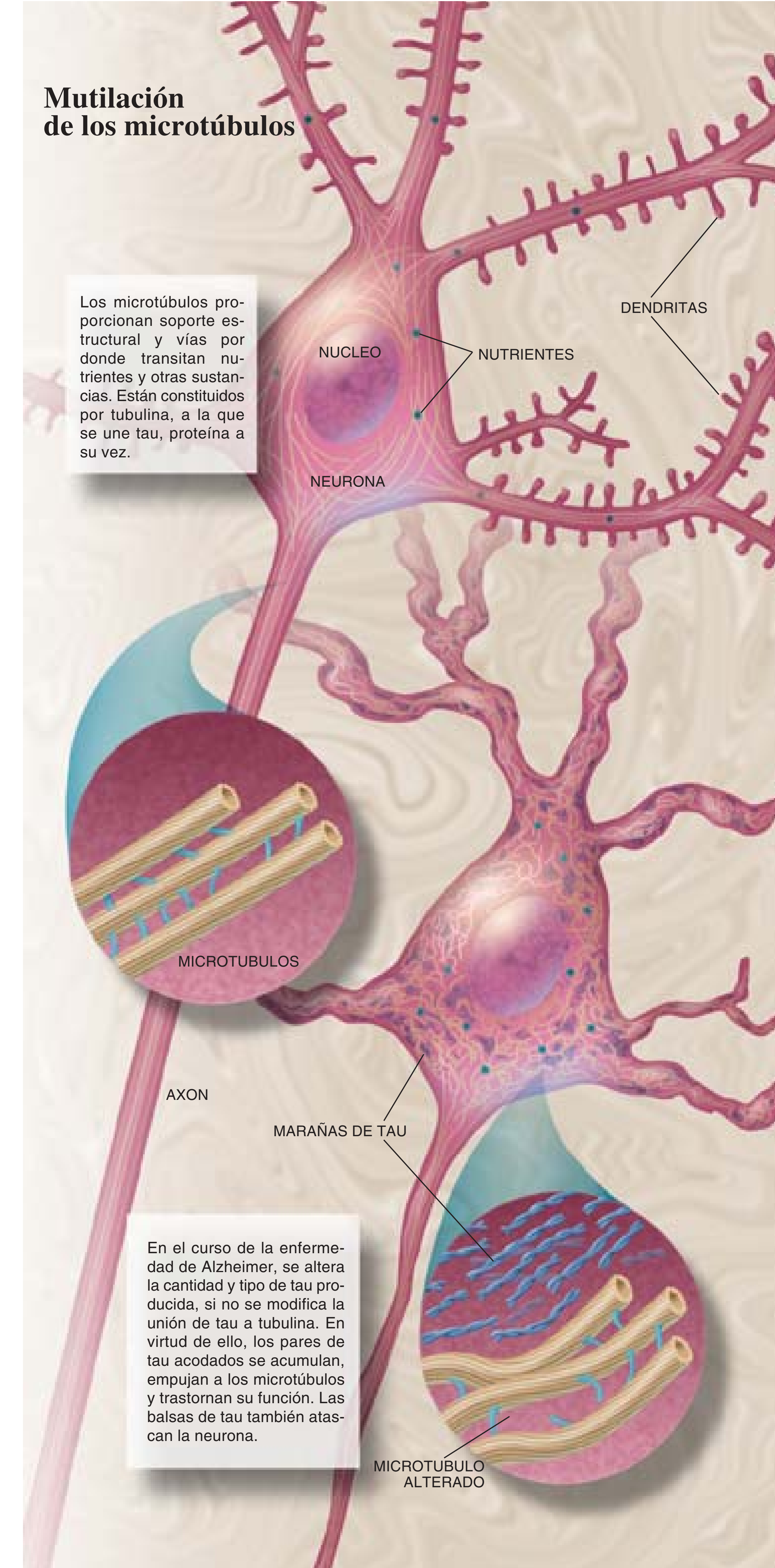
En condiciones normales, estos filamentos β-amiloideos constan de 40 aminoácidos. Pero un pequeño número de ellos, por debajo del 10 por ciento, tiene dos aminoácidos más. Peter T. Lansbury y Bruce Yankner, de Harvard, así como Paul E. Fraser y Joanne McLaurin, de la Universidad de Toronto, entre otros, han demostrado que esta forma ligeramente más larga es la que da origen a las placas y la que ejerce un efecto tóxico directo sobre las neuronas.

De la investigación preliminar para conocer el daño operado en las neuronas por la versión de 42 aminoácidos se desprenden dos modos de actuación. Primero, el péptido parece alterar la regulación del calcio, lo

que puede suponer la muerte celular. Segundo, puede dañar a las mitocondrias, con la liberación consiguiente de radicales libres de oxígeno, que modifican las proteínas, lípidos y ADN. Por último —como se ha apuntado antes— hay datos de que el péptido de 42 aminoácidos y los trastornos que produce pueden provocar la liberación de compuestos celulares. Estos, a su vez, pueden atraer a las células inmunitarias, desencadenando una respuesta inflamatoria, que podría exacerbar otras alteraciones iniciadas por el péptido, provocando lesiones que se agudizan en un círculo vicioso. Pese al interés de todos esos posibles mecanismos, no hay acuerdo en cuál sea su importancia proporcional en el desarrollo de la demencia.

Mientras los biólogos moleculares proseguían en sus investigaciones sobre la función de la βAPP y del fragmento del péptido β-amiloideo, los genéticos ahondaban en las mutaciones del gen βAPP. Identificaron varias que provocaban substituciones de aminoácidos en los sitios precisos de la secuencia βAPP donde las enzimas alfa-, beta- y gamma-secretasas efectúan los cortes. Más o menos acorde con lo esperado, estas mutaciones aumentan la cantidad de ambas formas del péptido β-amiloideo producido o incrementan la producción de la versión tóxica más larga.

La idea de que el Alzheimer debíase a cambios experimentados en la maduración de βAPP recibió un nuevo respaldo con el descubrimiento de mutaciones en un grupo de genes que impedían el corte de βAPP. En 1995 mis colaboradores y yo clonamos dos genes, *presenilin 1* y *presenilin 2*. Las roturas en tales genes —situados, respectivamente, en el cromosoma 14 y en el cromosoma 1— causan una forma muy agresiva de la enfermedad de Alzheimer de aparición precoz. (Las formas de aparición precoz suelen evidenciarse en un 10-60 por ciento de los pacientes de Alzheimer de tipo familiar.) Ambos genes determinan proteínas que van de un lado a otro de la membrana celular varias veces, como puntadas en un paño. Estas proteínas sufren un proceso de maduración complicado, durante el cual se cortan en dos piezas, que se incorporan en un complejo proteico cuya función estriba, a su vez, en cortar otras proteínas ancladas en la membrana, como la βAPP y la proteína "notch" (muesca), implicada en el desarrollo embrionario.



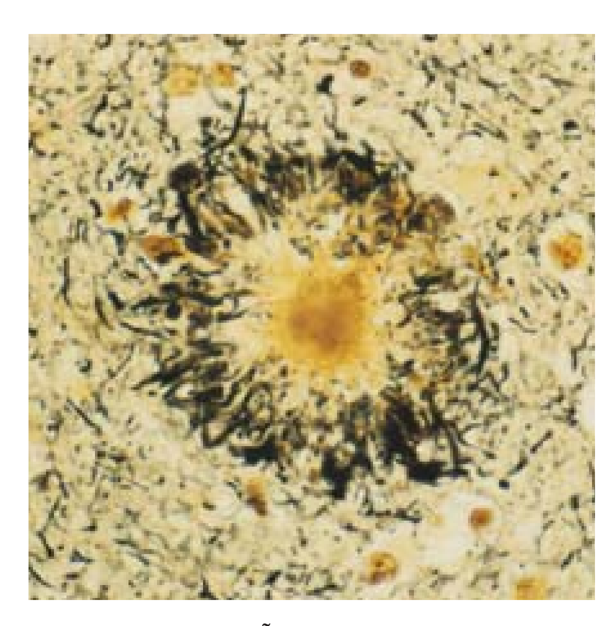
En el lugar equivocado

Bart De Strooper, del Instituto Interuniversitario de Flandes en Lovaina, Christian Haass, de la Universidad Maximiliano de Munich, Gopal Thinakaran, de la Universidad de Chicago, y mi grupo en Toronto han puesto de manifiesto que ciertas mutaciones inducidas en proteínas presenilin alteran la actividad de estos complejos y, en consecuencia, se interponen en la maduración de las proteínas sobre las que actúan. Sabemos que βAPP constituye uno de los objetivos de los complejos porque las mutaciones inducidas en ratones impiden que produzcan *presenilin 1*. Por tanto, la gamma-secretasa no efectúa el corte final de βAPP, ni los ratones sintetizan el péptido β-amiloideo. En los roedores mutados, tampoco se cortan según es debido otras proteínas de la membrana, "notch" incluida.

En cambio, las mutaciones de *presenilin 1* y *2* experimentadas por personas con Alzheimer de tipo familiar aumentan la actividad secante de la gamma-secretasa y, por tanto, fomentan la producción exagerada de péptido β-amiloideo, sobre todo de la versión destructiva más larga. No sabemos si las presenilinas son la propia gamma-secretasa, aunque es posible. Cabe también que las proteínas presenilinas se hallen implicadas, de manera indirecta, en la actividad de la gamma-secretasa, ya sea activándola o mediando su actividad al facilitar el contacto de la enzima con βAPP.

Pese al efecto drástico operado por las mutaciones en los genes de βAPP y de presenilina, explican sólo el 50 por ciento de los casos de tipo familiar e inicio precoz; con otras palabras, dan cuenta, a lo más, del 5 por ciento de todos los episodios de Alzheimer en la población general. Hay otro gen implicado en cuantía mayor.

En 1993 Allen D. Roses, con sus colaboradores Margaret Pericak-Vance y Jonathan Haines, avanzaron la existencia posible, en el cromosoma 19, de un gen asociado con la forma habitual de la enfermedad que aparece en una etapa tardía de la vida. Roses y Warren J. Stritmatter aislaron la apolipoproteína E, o APOE, que transporta colesterol en la sangre e interviene en la reparación y regeneración celular. El gen de la APOE aparece en tres formas, o alelos, cuyas frecuencias varían ligeramente en las poblaciones: la forma ε3, reputada normal, se presenta en el 40-90 por ciento de la población; ε2 y ε4, menos frecuentes, ocurren en el 2 por ciento y entre el 6 y el 37 por ciento de la población, respectivamente. En los pacientes de Alzheimer, sin embargo, Roses y su grupo observaron que la incidencia de ε4 era bastante alta: en torno al 40 por ciento.



4. PLACAS Y MARAÑAS aparecen juntas en la imagen, como suele ocurrir en las etapas tardías de la enfermedad de Alzheimer. El núcleo β-amiloideo de la placa, teñido de color amarillo, está rodeado por un halo de terminaciones nerviosas que contienen filamentos de tau teñidos de negro. Las células inflamatorias del cerebro —la microglía y los astrocitos— son las estructuras angulares teñidas de color marrón que se distinguen entre las terminaciones nerviosas.

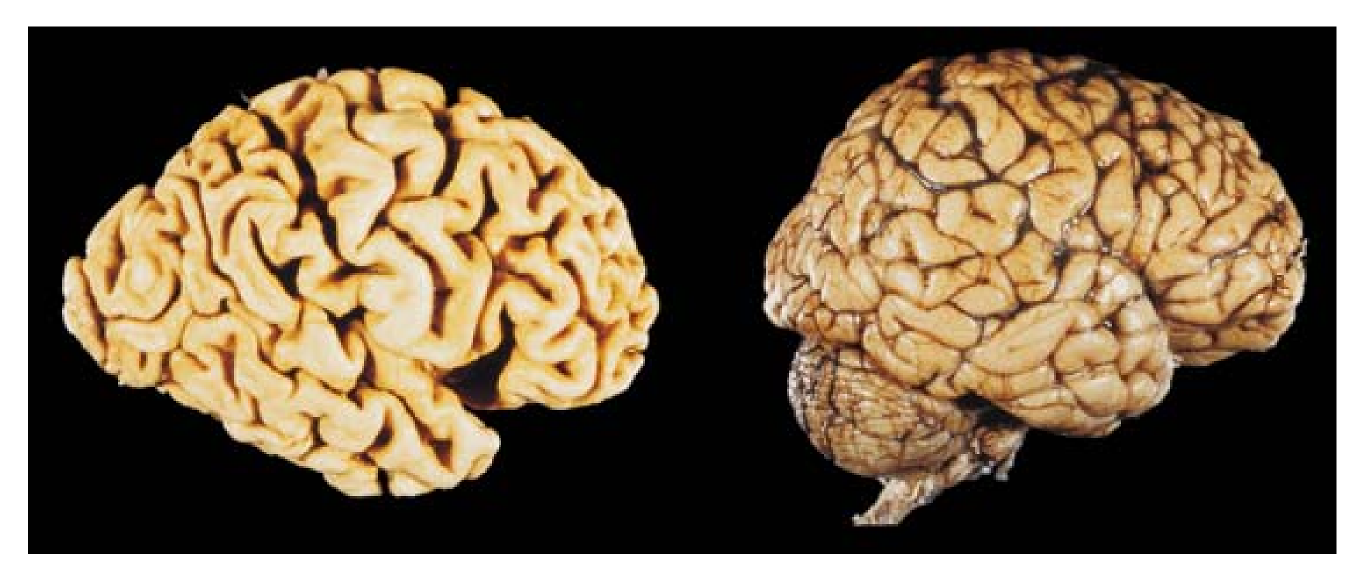
La presencia del alelo ε4 eleva quizás el riesgo de contraer la enfermedad. Para unos, la forma ε4 de la proteína compite con el péptido β-amiloideo en su eliminación del espacio intercelular. Se ha observado que una molécula responsable del arrastre de estos materiales fuera del espacio intercelular transporta la proteína ε4 con mayor eficacia que al péptido β-amiloideo. En consecuencia, dicho péptido se acumula y puede desencadenar trastornos bioquímicos. Que las cosas pudieran desarrollarse así, se infiere de la concentración de péptido β-amiloideo en pacientes ε4 mayor que en los ε2 o ε3. Además, los que sufren una mutación en βAPP y en el alelo ε4 manifiestan Alzheimer mucho antes que las personas que tienen la misma mutación en βAPP pero la forma ε2 o ε3 del gen APOE.

De acuerdo con la información recabada en los últimos decenios, la maduración anómala de βAPP y del péptido β-amiloideo constituye uno de los acontecimientos iniciadores del Alzheimer. Pero quedan por descubrir piezas importantes del rompecabezas. En una fase muy temprana comienzan ya los problemas con el corte de βAPP y la acumulación de péptido β-amiloideo. Pero, ¿qué pasa después? ¿Por qué la densidad de las placas β-amiloideas no refleja la gravedad de la demencia? Importa averiguar, en definitiva, si es la masa del péptido β-amiloideo lo que engendra la demencia. En mi opinión, las alteraciones operadas en el βAPP y en el péptido β-amiloideo desencadenarían la enfermedad de Alzheimer al activar una serie de procesos que terminarían por dañar y matar a las neuronas, dando lugar a la demencia. Uno de esos procesos deletéreos podría ser la formación de las marañas neurofibrilares.

Volvamos a tau

Hasta hace poco se consideraba proceso secundario e inocuo la formación de pares de proteína tau enredados de modo incorrecto. El estudio de la demencia frontotemporal ha puesto en cuestión esa tesis. La frontotemporal es una expresión rara de demencia en la que algunos pacientes presentan depósitos de tau. Y al igual que sucede con la enfermedad de Alzheimer, hay ejemplos de demencia frontotemporal de tipo familiar. De la investigación emprendida por Kirk C. Wilhelmsen y otros se desprende que los genes contribuyen al tipo familiar de la enfermedad.

Uno de esos genes reside en el cromosoma 17, donde se aloja también el gen tau. Al examinar los pacientes de demencia frontotemporal con acumulación de tau, Gerard D. Schellenberg identificó, en 1998, una mutación en el gen de tau. No fue un hallazgo menor. Sugería que esa demencia podía generarse directamente por un procesamiento anómalo y acumulación de tau.



5. LA ATROFIA CEREBRAL revela el daño producido en la enfermedad de Alzheimer. Ciertas regiones del cerebro —incluidos el hipocampo y la corteza— pierden neuronas. Los surcos normales de la superficie del cerebro languidecen. Para hacerse una idea de semejante destrucción basta comparar el cerebro de un paciente de Alzheimer (*izquierda*) con el de un individuo normal de la misma edad (*derecha*).

Es probable, pues, que debamos incluir las marañas neurofibrilares entre los componentes del Alzheimer. En ese marco hallaría una explicación mejor la asociación entre densidad de las marañas neurofibrilares y gravedad de la demencia, señalada ya hace 10 años por Robert D. Terry y Robert Katzman. Ignoramos el mecanismo exacto en virtud del cual una mutación en el gen tau causa la demencia frontotemporal, pero ciertos experimentos apuntan hacia la idea sugerida antes, un caos en los microtúbulos. El comportamiento incorrecto del gen tau podría impedir la unión de tau a la tubulina —la espina dorsal de los microtúbulos— o romper el equilibrio en los tipos de proteína tau que se producen. De ambos episodios, tomados en conjunto, resultaría una síntesis excesiva de tau libre, que se acumularía en filamentos helicoidales emparejados. Las estructuras microtubulares dejarían de funcionar en el sentido debido y los haces de tau estrangularían el mecanismo de transporte celular. Por culpa de todo ello, las neuronas no podrían transmitir señales eléctricas, ni transportar nutrientes y otros compuestos necesarios hasta lugares alejados. Parece, pues, harto probable que las anomalías producidas en βAPP y el péptido β-amiloideo ponen en marcha una serie de procesos, un subgrupo de los cuales altera la proteína tau, que a su vez daña las neuronas, con la demencia consiguiente.

Nuevos tratamientos

Merced a los descubrimientos registrados en el campo de la bioquímica, biología molecular, genética, epidemiología y clínica, a lo largo de los últimos 10 años, hemos avanzando en el conocimiento de los mecanismos subyacentes del Alzheimer. Cabe esperar que en los años venideros se encarnen en tratamientos útiles. Posiblemente, algunas terapias se fundarán en el procesamiento incorrecto de tau. De hecho, los progresos en el desciframiento de βAPP y el péptido β-amiloideo guían las investigaciones aplicadas.

Se trabaja en el diseño de sustancias que bloqueen la actividad enzimática de la beta- o la gamma-secretasa, es decir, su capacidad secante del βAPP, y, con ello, evitar la creación de un compuesto nocivo, el péptido β-amiloideo. Otros buscan el alivio de los efectos del péptido una vez generado éste. Están ya en marcha pruebas clínicas para comprobar si la vitamina E, antioxidante, o los fármacos antiinflamatorios no esteroideos como el ibuprofen pueden amortiguar algunos de los efectos tóxicos del péptido β-amiloideo.

Un tercer grupo se afana en reducir la acumulación de péptido β-amiloideo mediante fármacos que imiten colorantes como el rojo Congo, que pueden insertarse en las placas amiloideas, o mediante glicoaminoglicanos, que aparecen implicados en la agrupación del péptido β-amiloideo. Se trata de sustancias capaces de deshacer, desde su interior, los agregados de péptido β-amiloideo.

Siguiendo esta línea de razonamiento, Dale Schenk y su equipo acaban de anunciar sus resultados con una vacuna basada en el péptido β-amiloideo. Experimentaron en ratones con una versión de Alzheimer caracterizada por las placas amiloideas, pero no por las marañas de tau; tras aplicarles una vacuna hecha con el péptido β-amiloideo, los animales reducían el número de placas. Podían entrenar al organismo para atacar y disponer de los cúmulos de péptido β-amiloideo. Resolver la eficacia de semejante vacuna en humanos constituirá un tema del máximo interés en investigación clínica.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NEUROPATHOLOGY OF DEMENTING DISORDERS. Dirigido por W. R. Markesbury. Arnold, 1998.

ALZHEIMER DISEASE. Dirigido por R. D. Terry, R. Katzman, K. L. Bick y S. S. Sisodia. Segunda edición. Lippincott, Williams and Wilkins, 1999.

NICASTRIN MODULATES PRESENILIN-MEDIATED *Notch/glp-1* SIGNAL TRANSDUCTION AND βAPP PROCESSING. Peter St George-Hyslop, Gang Yu y cols. en *Nature*, vol. 407, págs. 48-54; 7 de septiembre de 2000.

El gas más frío del universo



1. LOS REMOLINOS CUANTICOS, o vórtices, son la única manera que un superfluido tiene de rotar. En esta simulación teórica se ven cuatro vórtices que atraviesan un condensado y dos nuevos que se están formando en los bordes. Los colores indican la "fase" cuántica alrededor de cada vórtice.

Los condensados de Bose-Einstein constituyen una de las áreas más inquietas de la física experimental

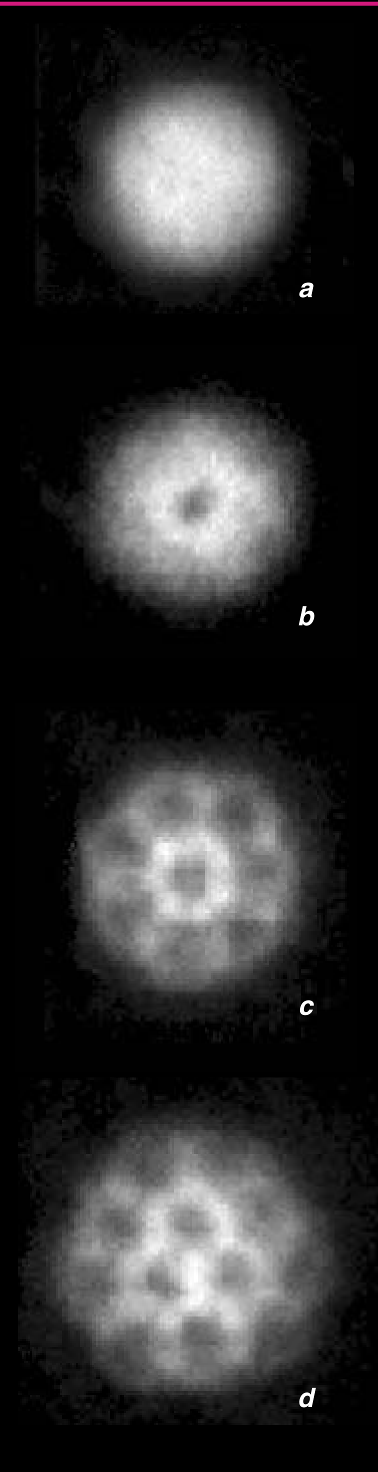
Graham P. Collins

Imagine que, por arte de magia, se ha convertido en una macromolécula. Así empequeñecido, observa el movimiento de los átomos de un gas. Le parecerán canicas irrompibles que van de acá para allá a través de un espacio casi vacío, rebotando sin cesar unas en otras. De esa guisa suelen describir un "gas ideal" los profesores de segunda enseñanza.

Note ahora que las canicas vuelan con mayor tranquilidad que cuando salió usted del miniaturizador. Hay algo que debe de estar enfriando el gas. Al principio, las canicas pierden sólo un poco de velocidad y están un poco menos espaciadas; la densidad del gas aumenta mientras se enfría. Pero llega un momento inesperado en que ve que las canicas mismas están cambiando. Las más lentas se hacen cientos de veces mayores y sus superficies, antes bruñidas como espejos, se vuelven confusas, indeterminadas. Esos átomos, cada vez más fantasmagóricos, pasan unos a través de los otros, unas veces sin desviarse y otras rebotando como si hubiesen chocado dentro con algo duro.

Cerca del centro de esa región, dos de los átomos más neblinosos se solapan y parece que se funden en un macroglóbulo, un elipsoide que absorbe otros átomos, de uno en uno y de dos en dos, y a docenas luego, hasta que, con asombrosa rapidez, se queda solo, como un inmenso, inmóvil globo cautivo. ¿Qué ha sido de cada átomo? ¿Qué es ese misterioso objeto?

Es un ente mecanocuántico, un condensado de Bose-Einstein (CBE), el tipo de gas más frío del universo. Y los átomos existen todavía en él, como componentes suyos, pero han perdido su individualidad.



2. IMAGENES de retículos de vórtices tomadas en un condensado de átomos de rubidio que se había agitado. El condensado no rotaba (*a*) mientras la agitación no era lo bastante fuerte como para generar un vórtice completo (*b*), en el cual cada átomo tiene un cuanto de momento angular. Cuando se lo agita más deprisa se añaden más vórtices y aumenta la rotación. Estos ejemplos de aquí tienen 8 (*c*) y 12 (*d*). En los núcleos oscuros de los vórtices, la rotación se aviva y el gas muestra menor densidad.

Asimilados a los CBE

Otros condensados

Los condensados de 1995 no fueron los primeros ejemplos de condensación de Bose-Einstein, pero tenían varias propiedades que hacían de ellos manifestaciones singularmente puras del fenómeno. Para ser precisos, los nuevos condensados están más diluidos, son gaseosos y constan de átomos. Entre los condensados y sistemas semejantes anteriores se encuentran:

El helio superfluido. Cuando se enfría el helio 4 por debajo de los 2,2 kelvin toma la asombrosa propiedad de la superfluidez. El líquido fluye sin ninguna viscosidad, gracias a lo cual hay cosas tan extraordinarias como el surtidor de helio (*derecha*). El estado superfluido se produce porque una fracción (hasta un 10 por ciento) de los átomos de helio padecen la condensación de Bose. Como la interacción entre los átomos del líquido es intensa, cuesta mucho estudiar teórica o experimentalmente las propiedades cuánticas intrínsecas de la fracción condensada.



EL SURTIDOR de helio, puesto en marcha por la bobina calefactora, constituye un espectacular ejemplo de superfluidez. Hasta un décimo de los átomos de helio están en la forma de un condensado líquido de Bose-Einstein.

Láseres. La luz de un láser tiene muchas de las propiedades de un condensado de Bose-Einstein. La luz está compuesta por fotones, con naturaleza de partícula y de onda. En la luz corriente, la de una bombilla, por ejemplo, las ondas de los fotones no se hallan sincronizadas. En un láser todas están "en fase", es decir, las crestas se alinean con las crestas y los valles con los valles; esos fotones marcan un mismo paso, como soldados en un desfile, o dicho con otras palabras, todos los fotones se encuentran en el mismo estado cuántico. El proceso de amplificación que produce un haz de láser aprovecha la propensión de los fotones a juntarse en el mismo estado cuántico.

Superconductores. La condensación de Bose de pares de electrones genera superconductividad, el flujo de la corriente eléctrica sin resistencia. Los electrones desparejados no pueden producir un condensado de Bose porque son fermiones, no bosones. Sólo en ciertas condiciones se crean pares de electrones con una unión floja; ocurre, por ejemplo, en el aluminio enfriado a 1,2 kelvin. Esos pares *son* bosones y experimentan inmediatamente una condensación de Bose. El proceso de emparejamiento y la carga eléctrica de los pares hacen de los superconductores un sistema muy diferente a un condensado neutro y diluido. En el helio 3 superfluido, cuyos átomos son fermiones, hay un emparejamiento y una condensación similares.

Excitones. En los semiconductores, la ausencia de un electrón, o "hueco", se comporta como una carga positiva. Un hueco y un electrón generados por un impulso láser pueden emparejarse y crear un ente llamado excitón. Se observaron en 1993 pruebas de que los excitones formaban un condensado gaseoso efímero en un semiconductor de óxido de cobre. *—G.P.C.*

La mecánica cuántica gobierna el mundo. La mayor parte del tiempo sus singulares características se ocultan tras una fachada clásica, que confundimos con la sustancia de la realidad, de la que nace nuestro sentido común acerca de cómo son las cosas: los objetos ocupan lugares definidos, realizan movimientos prescritos, poseen identidades fijas y se atienen rígidamente a leyes deterministas.

El cogollo mismo de la mecánica cuántica, en cambio, desafía nuestras intuiciones cotidianas. Las posiciones y movimientos de las partículas, sujetos a probabilidades, son equívocos por naturaleza. Hasta la noción de objeto con identidad propia sufre una radical modificación en la mecánica cuántica. Un condensado de Bose-Einstein es una porción de materia con las más puras hechuras cuánticas que se conocen.

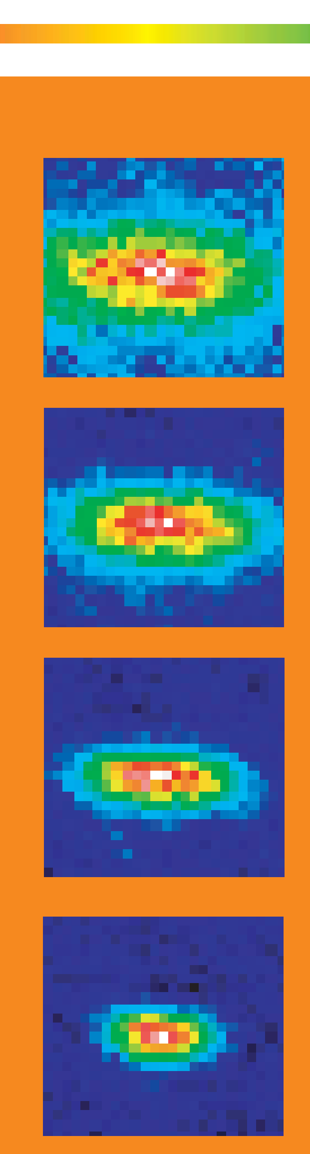
Además, los condensados son inmensos, cien mil veces mayores que los mayores átomos corrientes, mayores incluso que una célula humana. En un condensado puede observarse la naturaleza cuántica. Como dice Steven L. Rolston, del Instituto Nacional de Pesos y Medidas (NIST) en Gaithersburg: "Las imágenes que enseñamos de los CBE son verdaderas imágenes de una función de ondas mecanocuántica; podemos realmente ver la mecánica cuántica en acción."

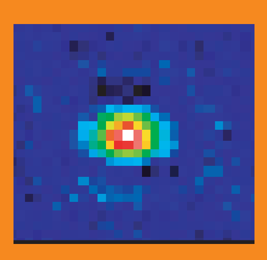
Los primeros condensados de Bose-Einstein se crearon en el laboratorio en 1995, nada menos que setenta años después de que Albert Einstein predijese el fenómeno basándose en los trabajos del físico indio Satyendra Nath Bose [*véase* "El condensado de Bose-Einstein", de Eric A. Cornell y Carl E. Wieman, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1998]. Los condensados se crean en trampas de átomos, construcciones hechas de haces de rayos láser y campos magnéticos que atrapan y enfrían nubes de átomos muy diluidas dentro de una cámara de vacío. Según Daniel Kleppner, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, la creación de estos condensados es "el avance de la física atómica más apasionante desde la aparición del láser".

Grupos de investigadores sobresalientes de distintas partes del mundo llevan cinco años explorando el exótico territorio abierto por ese descubrimiento. Han atizado y pinchado los condensados con haces de láser, sacudido las trampas que los encierran y observado cómo el gas rebota, chapotea y vibra, tal y como se esperaba, a la manera cuántica.

Los condensados no sólo son un ejemplo de sistema cuántico, sino que juntan en sí una curiosa amalgama de varios, y vastos, campos de la física: la atómica (los átomos sueltos), la óptica cuántica (los haces de láseres y su interacción) y la de muchos cuerpos (los agregados de materia que hacen sólidos, líquidos y gases, entre ellos los metales y semiconductores, vitales para la técnica, donde hay flujos de electrones). El estudio de los condensados no sólo abarca, de manera multidisciplinaria, todos esos campos, sino que contribuye de forma directa a que conozcamos las leyes básicas que los gobiernan.

Este artículo sólo puede recoger unos cuantos de los asombrosos y variados logros experimentales que se están consiguiendo con los CBE. Los resultados sacan a luz algunas de las muchas caras que los condensados presentan a los experimentadores: como superfluidos semejantes al helio líquido, como gases atómicos que se controlan con mucha precisión, como un tipo de haz de láser hecho de materia y no de luz.





3. LAS FUERZAS que actúan entre los átomos de un condensado cambian su tamaño y proporciones. Aquí, se han ajustado las fuerzas de muy repulsivas (*arriba*) a casi nulas (*abajo*). Un nuevo afinamiento de las fuerzas, que las volvía un poco atractivas, hacía que el condensado se desplomara y estallase como supernovas en miniatura.

CBE, superfluidos y vórtices

Cuando se enfría el helio líquido a menos de 2,2 kelvin del cero absoluto pasan cosas extrañas. Como descubrieron el físico soviético Pyotr Kapitsa y el canadiense John F. Allen en 1938, por debajo de esa temperatura se vuelve superfluido, corre sin viscosidad alguna, trepa por las paredes de un recipiente abierto y se sale de él. La condensación de Bose-Einstein del helio produce esos mismos efectos.

Había impaciencia por ver si todos los condensados gaseosos exhibían superfluidez, pero no ha sido coser y cantar. Se puede producir helio superfluido en cantidades suficientes para observar a simple vista sus rarezas. En cambio, los nuevos condensados son pizcas insignificantes de gas, apenas con más sustancia que un vacío, que unos campos electromagnéticos mantienen en su sitio sólo unos minutos, como mucho. ¿Qué significa que un vapor tan tenue sea superfluido?

Un fenómeno espectacular es la producción de vórtices en un superfluido que rota. Si se dan vueltas a un cubo de helio líquido ordinario sobre un plato giratorio, el helio rotará con el cubo tal y como haría el agua. En el helio superfluido, por contra, se formará una ordenación de remolinos cuánticos o vórtices. La rotación mínima posible tiene sólo un vórtice, que gira deprisa en el centro del helio y despacio en los bordes. Si se intenta que el superfluido rote más despacio, permanecerá inmóvil.

Pasa eso porque los átomos de un condensado se hallan en el mismo estado cuántico y, por tanto, han de tener un mismo momento angular, pero éste sólo puede valer un número entero de veces una unidad, o cuanto. En el estado de inmovilidad, todos los átomos tienen cero unidades de momento angular; en un vórtice, una.

Un grupo de investigadores del instituto JILA de Boulder, dirigido por Carl E. Wieman y Eric A. Cornell, creó en 1999 vórtices en condensados con un procedimiento propuesto por sus compañeros James E. Williams y Murray J. Holland. Emplearon un condensado doble, un sistema muy versátil ideado por el propio grupo, que superpone dos condensados del mismo elemento (rubidio) y estados cuánticos un poco diferentes.

Iluminaron el condensado doble con microondas y un haz de láser a fin de impartir a uno de los condensados la fase cuántica circular precisa que se necesita para crear un vórtice. Este procedimiento produce el estado, rotatorio, de vórtice, aunque sólo a un físico cuántico le parecerá que algo así mueve átomos. Al observar cómo se interferían entonces los dos condensados el grupo pudo verificar las propiedades de la fase cuántica del vórtice, algo que no se había conseguido en sesenta años de investigaciones con el helio superfluido.

Después, todavía en 1999, un grupo de la École Normale Supérieure de París dirigido por Jean Dalibard logró lo que otros no habían podido, simular la generación de vórtices por un "cubo giratorio". Para producir la rotación movieron un haz de láser por el borde de la trampa de forma que su perfil sufriese una especie de distorsión rotatoria. Han tomado imágenes de ordenaciones de hasta 14 vórtices. En el artículo resultante, publicado en septiembre de 2000, indicaban que habían medido el momento angular de sus condensados: tal y como predecía la teoría, era cero hasta que aparecía el primer vórtice; entonces saltaba una unidad entera.

Más allá de su interés para la física fundamental, la dinámica cuántica de los vórtices cuenta también para la técnica porque interviene en los superconductores de

Conceptos fundamentales

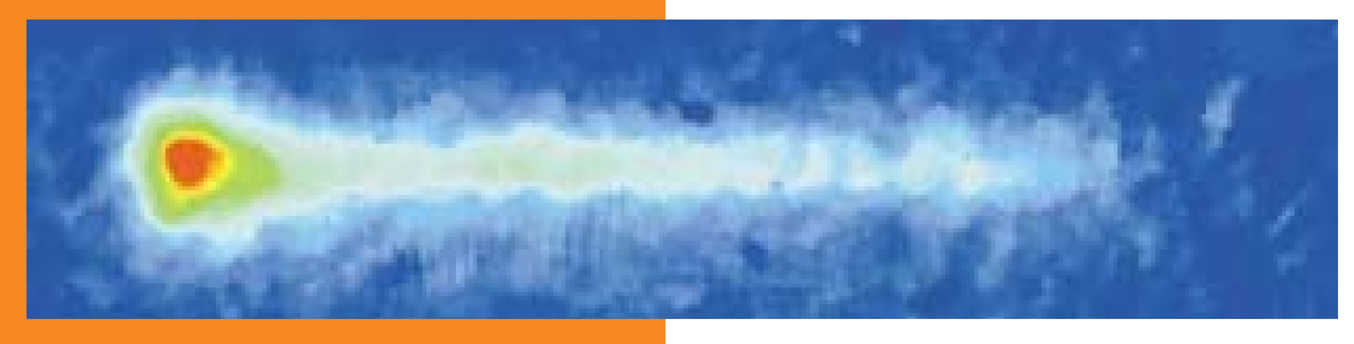
La mecánica cuántica describe la manera de operar la naturaleza a escala atómica; muchas de sus características repugnan a la intuición y al sentido común. En mecánica cuántica, las partículas tienen propiedades ondulatorias: la "función de ondas" de una partícula define su estado cuántico. Por su propia naturaleza cualquier partícula elemental será fermión o bosón.

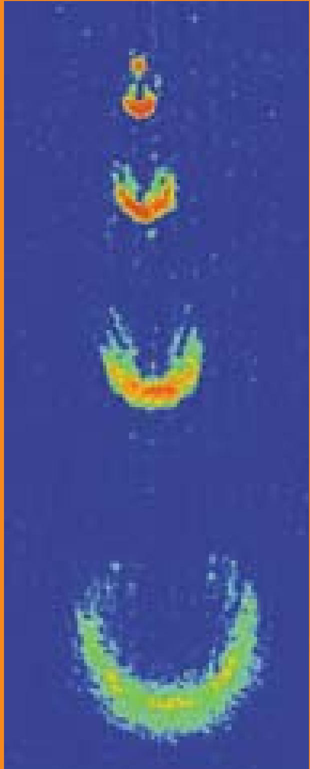
Los fermiones no pueden ocupar estados cuánticos idénticos en un mismo lugar. Los electrones, los protones y los neutrones son fermiones.

Los bosones de una misma especie, en cambio, tienden a juntarse en un solo estado si se les da la oportunidad. Los fotones (las partículas de la luz) son bosones. Las partículas compuestas, los átomos, por ejemplo, son también bosones o fermiones. Un átomo que tenga un número par de protones, neutrones y electrones es un bosón.

La condensación de Bose-Einstein (CBE) se produce cuando un conjunto de bosones de una misma especie se enfría y adquiere densidad suficiente, aunque sin constituir un sólido. A temperaturas bajísimas las funciones de onda se agrandan; cuando se superponen las de bosones, éstos se acumulan en un solo estado cuántico.

El comportamiento de los CBE arroja luz sobre los fundamentos de muy diversos campos de la física, como la mecánica cuántica, la superfluidez, la superconductividad, las propiedades e interacciones de los átomos, la física de los láseres y la óptica no lineal.





4. LOS ATOMOS de láseres son, en líneas generales, condensados móviles, análogos materiales de los impulsos o haces de los láseres ópticos. El primer láser de átomos (*izquierda*) tenía como "fuente de energía" a la gravedad. Unos impulsos de ondas de radio daban en un condensado atrapado (*el círculo de arriba*) y desprendían del mismo porciones de condensado (*las medias lunas*). La repulsión entre los átomos de sodio daba a éstas forma de media luna y aceleraba su expansión. En el primer láser de átomos (*arriba*), los átomos eran impelidos fuera de la trampa, hacia un lado, por haces de láser.

alta temperatura: los campos magnéticos penetran en esos materiales creando en ellos ordenaciones de vórtices de corriente eléctrica cuyo movimiento disipa energía y arruina la resistencia nula, la propiedad donde está todo el interés de los superconductores. Los estudios que se irán haciendo con los CBE quizás alivien este problema.

Interacciones atómicas maleables

Los núcleos de los vórtices del helio superfluido tienen un diámetro de sólo una décima de nanómetro y es casi imposible examinarlos con detalle. Los de los vórtices de Colorado y París son unas 5000 veces mayores porque los condensados gaseosos, comparados con el helio líquido, tienen una densidad bajísima y, muy débil, la interacción entre sus átomos.

Nada, en el fondo, puede hacerse acerca de la densidad y las interacciones del helio líquido; la densidad de un CBE gaseoso puede, en cambio, ajustarse apretando o aflojando las trampas magnéticas que sujetan el gas. Además, los físicos tienen la notable posibilidad de modificar las interacciones de los CBE gaseosos con girar un mando. Es el sueño de los experimentadores; imagínese cómo se investigaría la química si se pudiesen debilitar o fortalecer a voluntad los enlaces entre los átomos.

Los átomos de los condensados gaseosos experimentan una pequeña repulsión o una atracción mutua, según del tipo que sean. Por ejemplo, los átomos de sodio, rubidio 87 e hidrógeno repelen a los de su especie, en cambio los de litio 7 y rubidio 85 los atraen. Esas fuerzas, aunque muy pequeñas, modifican innumerables propiedades del condensado, como la energía interna, el tamaño, los modos de oscilación y el ritmo de formación; lo más importante, sin embargo, es que la repulsión estabiliza el condensado y la atracción lo desestabiliza. Por eso, los experimentos hechos con los repulsivos rubidio 87 o sodio condensan, sin mayores dificultades, millones de átomos, y los condensados finales son 20 veces mayores que si no hubiese habido repulsión. Por el contrario, la atracción limita a unos 1500 átomos los condensados de litio 7 del grupo de Randall G. Hulet, de la Universidad Rice. Por encima de ese tamaño, el condensado se contrae, se vuelve demasiado denso y se producen colisiones que lanzan los átomos fuera de la trampa. Gracias a la elaboración de refinados modelos teóricos se sabe hoy bien qué pasa en esas circunstancias, cuando diez años atrás se dudaba incluso de que los átomos pudiesen siquiera formar un condensado.

Las llamadas resonancias de Feshbach, en honor del teórico nuclear del MIT Hermann Feshbach, que estudió en los años sesenta un fenómeno análogo en los choques de núcleos atómicos, modifican las interacciones atómicas. Un campo magnético fuerte distorsiona los átomos de un gas, y a ciertas intensidades habrá una resonancia entre los pares de átomos colisionantes. En un condensado los átomos sienten sin cesar los efectos de esas resonancias porque sus ondas cuánticas se traslapan; las resonancias modifican las fuerzas ejercidas entre los átomos y los mayores efectos se dan cerca de la intensidad del campo magnético que crea las resonancias.

Pero un campo magnético intenso destruye la prisión magnética de los átomos. El grupo de Wolfgang Ketterle resolvió en el MIT en 1998 el problema encerrando los condensados de sodio no en una trampa magnética, sino en una de láser. El grupo del MIT pudo observar los efectos de las resonancias de Feshbach, pero le fue imposible estudiarlos detenidamente: para sorpresa de los investigadores, cuando se afinaban los campos magnéticos de manera que la intensidad estuviese cerca de la de resonancia los condensados de sodio se desintegraban en unos microsegundos.

El grupo de Cornell y Wieman creó, a principios del año 2000, condensados de vida más larga con rubidio 85 y una trampa magnética corriente. Por lo normal, las interacciones atractivas del rubidio 85 impiden que sus condensados tengan más de 80 átomos. Pero gracias a las resonancias de Feshbach el grupo de Colorado lo-

gró que esas fuerzas pasaran a ser repulsivas y así obtuvo condensados estables de hasta 10.000 átomos con vidas de 10 segundos incluso.

Los efectos más espectaculares ocurrían cuando el grupo disminuía gradualmente la repulsión artificial. De acuerdo con lo predicho por la teoría, el tamaño de los condensados gigantes iba menguando y su densidad aumentaba sin saltos bruscos, pero al final, unos cinco milisegundos después de que las interacciones hubieran vuelto a ser atractivas, estallaban, fenómeno que Wieman ha denominado con fantasía "la nova de Bose" porque recuerda vagamente a la implosión que precede al estallido de una estrella. Las explosiones arrojaban al menos un tercio de los átomos del condensado fuera por completo de la trampa y dejaban un condensado residual rodeado por una nube caliente de átomos (si a una temperatura de cien milmillonésimas de grado puede llamársela "caliente").

Láseres de átomos

Una posible aplicación del afinado de las interacciones es el delicado control de los haces de átomos que emiten los condensados. Se les denomina láseres de átomos. Los haces atómicos se aplican ya en los relojes atómicos, las medidas de precisión de las constantes fundamentales y la producción de chips de ordenador. No obstante, les faltan el brillo y la "coherencia" de un láser de átomos, tal y como a la luz corriente le faltan el brillo y la coherencia (y la versatilidad, pues) de un haz de láser. (Coherencia quiere decir ahí que todos los átomos y fotones del haz se mueven en una especie de sincronía cuántica, donde sus ondas asociadas están muy bien alineadas.)

El láser tardó decenios en dejar de ser el raro aparato experimental de 1960 y convertirse en un componente electrónico ubicuo. Hay investigadores que creen que en las próximas décadas los láseres de átomos podrían tener un futuro no menos fructífero, con aplicaciones inconcebibles hoy, como los usos actuales del láser lo eran hace cuarenta años. Claro está, entre esa profecía y su cumplimiento hay grandes obstáculos, y no es precisamente el menor que haya que lanzar los átomos por un vacío y no a través del aire.

Los primeros láseres de átomos generaban sus impulsos y haces de una manera completamente distinta de como lo hacen los láseres ópticos (algunos insistían en que no era un buen nombre ése de "láser" de átomos). En esencia, un láser de átomos es una porción o corriente de CBE que se mueve libre y coherentemente. A los átomos de CBE los encierra en una trampa magnética su propio dipolo magnético o espín. Unas ondas de radio convenientemente sintonizadas darán la vuelta a los espines de los átomos, que así se volverán inmu-

Máquinas para enfriar y encerrar átomos

Refrigeradores cuánticos

Enfriamiento por láser. Para crear un condensado de Bose-Einstein gaseoso hay que enfriar un gas diluido de átomos en una cámara de vacío hasta que su temperatura sea sumamente baja. En casi todos los experimentos, el primer paso es un enfriamiento por láser, en el que haces de láser frenan el movimiento de los átomos y reducen su temperatura desde la del ambiente (300 kelvin), o alguna mucho más alta, hasta unos 50 microkelvin, a una veintemilésima de kelvin del cero absoluto.

Trampa magneto-óptica (TMO). El dispositivo de preenfriamiento de uso más común en los experimentos de CBE es la trampa magneto-óptica, que combina el enfriamiento por láser con las trampas de átomos hechas de campos magnéticos. Estos contribuyen a que el gas se comprima hasta adquirir densidades mayores. Muchos grupos usan una secuencia de dos TMO, optimizadas respectivamente para ir recogiendo átomos y enfriarlos.

Enfriamiento evaporativo. La etapa de enfriamiento final en los experimentos con CBE recuerda a cómo se enfría una taza de café. Mientras una trampa magnética sujeta los átomos, se van eliminando constantemente los átomos más calientes y así va quedando un gas cada vez más frío. Al revés de lo que pasa con el enfriamiento por láser, el evaporativo funciona mejor con densidades mayores.

La trampa POPT. Con ella creó en el JILA el grupo de Eric A. Cornell y Carl E. Wieman el primer condensado atómico en 1995; luego han adoptado esta "trampa orbital promediada en el tiempo" varios grupos. Sus bobinas generan un campo magnético que tiene un punto cero por donde escapan los átomos. Al mover el campo con rapidez en círculo la trampa encierra los átomos en una región elipsoidal dentro de la órbita del escape (el "círculo de la muerte").

Las trampas de Ioffe-Pritchard (IP) Estas trampas, así llamadas en homenaje al físico ruso M. S. Ioffe (su trampa encerraba plasmas de iones cargados) y a David Pritchard, del MIT, generan un campo de confinamiento que no tiene un punto cero de escape. Se trata de la principal alternativa a las trampas POPT; sus diseños son variados y los condensados que crean pueden ser casi esféricos o como largos cigarros. Crea sus campos una corriente que circula por cuatro barras paralelas o por bobinas con forma de letra D, de costura de pelota de béisbol o de trébol de cuatro hojas.



ATOMOS DE SODIO resplandecientes, encerrados por una trampa magneto-óptica. Han sido observados por Kristian Helmerson, del Instituto Nacional de Pesos y Medidas. Unas bobinas producen un campo magnético y entran haces de láser por seis direcciones para retener y enfriar los átomos.

Trampa magnética permanente. Esta variante de las trampas IP genera los campos con imanes permanentes. El grupo de Randall G. Hulet, de la Universidad Rice, produce con ella condensados de litio. Los imanes permanentes no se pueden apagar, así que sólo pueden tomarse imágenes del condensado *in situ*.

nes a los campos que los aprisionan. El grupo de Ketterle aprovechó este fenómeno para crear en 1997 el primer láser de átomos. Bombardearon un condensado de sodio con impulsos de ondas de radio. Los átomos cuyos espines se daban la vuelta se caían de la trampa: ¡se convertían, empujados por la gravedad, en impulsos con forma de media luna de condensado en movimiento!

A finales de 1998 el grupo de Theodore Hänsch, de la Universidad de Munich, creó un sistema parecido que emitía un haz continuo de átomos de rubidio. El grupo de Munich calculaba que su haz atómico brillaba un millón de veces más que los haces de átomos semejantes (pero que no eran láseres) producidos de otras maneras. Más o menos al mismo tiempo, William D. Phillips, Steven Rolston y sus colaboradores del NIST produjeron un láser de átomos que podía apuntarse a alguna otra dirección que no fuese hacia abajo. Los átomos eran arrancados de la trampa con impulsos de láseres ópticos y pasaban por un agujero que giraba sobre la periferia de la trampa (llamaban a esa zona "círculo de la muerte"). Una secuencia de impulsos de láser meticulosamente sincronizados con el círculo de la muerte producía un haz colimado, a todos los efectos continuo. En una comunicación se lo describía como "una pistola de rayos atómica con la precisión de un láser"; suena exagerado, pero se atiene, técnicamente, a lo que es.

La "a" de "láser" viene de "amplificación", pero en los láseres de átomos descritos hasta aquí no había más amplificación que la que ocurre al principio, cuando se crea el CBE y la población de átomos en el estado cuántico único es "amplificada" por la condensación de Bose. La amplificación de los haces de los láseres de átomos, o amplificación de la onda de materia, se logró sólo a finales de 1999; la consiguieron dos grupos, cada uno por su parte, uno del MIT dirigido por Ket-

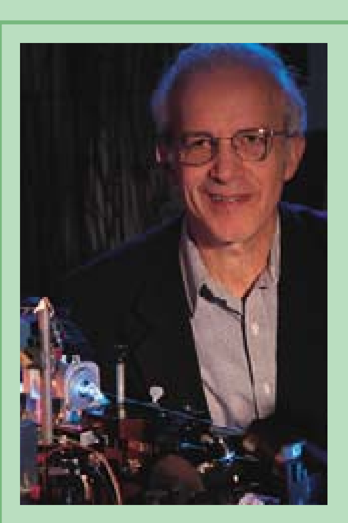
El hombre del hidrógeno

El padrino del CBE

Al año o par de años siguientes a la creación del CBE, a Daniel Kleppner, del MIT, se le presentaba en las reuniones científicas como "el padrino del CBE." El "padre del BCE" no podía ser, ya que, por desgracia, su grupo no había todavía creado ninguno. Y sin embargo presidía como un padre la especialidad, de la que fue pionero y era continuo participante, y de cuyas jóvenes figuras, los que se habían hecho con el ansiado grial, había sido mentor.

Dirigían los tres grupos que consiguieron los primeros CBE en 1995 y 1996 discípulos de Kleppner y discípulos de sus discípulos. Wieman trabajó en su laboratorio antes de licenciarse, a principios de los años setenta. Cornell fue alumno de doctorado de Pritchard, quien a su vez fue alumno de doctorado de Kleppner. Ketterle empezó a trabajar con átomos fríos siendo investigador posdoctoral bajo la dirección de Pritchard. Hulet fue doctorando del grupo de Kleppner, lo mismo que el premio Nobel Phillips, cuyo grupo obtuvo un CBE en 1998. Como cualquier maestro, Kleppner está muy orgulloso de los logros de sus alumnos.

Cuando sus antiguos discípulos estaban haciendo sus espectaculares condensados de rubidio, sodio y litio (átomos alcalinos), Kleppner se las veía y deseaba con el átomo al que había dedicado su carrera: el hidrógeno. Llevaba estudiándolo desde el doctorado y sus días de investigador posdoctoral en la Universidad de Harvard, a finales de los años cincuenta. Mientras trabajaba allí con Norman Ramsey, participó en la invención del máser de hidrógeno, una especie de láser que funcionaba con frecuencias de microondas y que se ha aplicado en mediciones extraordinariamente precisas, entre ellas comprobaciones de la relatividad general de Einstein. (El máser fue uno de los trabajos citados cuando se concedió el premio Nobel a Ramsey en 1989.) En 1966 Kleppner pasó de Harvard al MIT, donde ahora dirige el Laboratorio de Investigaciones Electrónicas.



DANIEL KLEPPNER se propuso conseguir un condensado de Bose-Einstein en 1976, compitiendo con un grupo holandés: "Nos llevó un poco más de lo que pensábamos."

Kleppner se introdujo en esa área hacia 1976 con el hidrógeno de espín polarizado. "Pensaba que era una idiotez", recuerda, pero un profesor joven, Thomas Greytak, le convenció de que merecía la pena. Desde entonces trabajan juntos.

En el hidrógeno de espín polarizado todos los átomos tienen los espines orientados de la misma forma (piense en el espín como en una pequeña aguja magnética que cada átomo portase consigo). Un gas así es tan inerte como el helio, porque dos átomos de hidrógeno han de tener espines orientados de forma opuesta para forjar una molécula. Caso único entre todos los elementos, esta forma de hidrógeno sigue siendo gas hasta llegar al cero absoluto.

Movidos por esas propiedades que se les predecían a los CBE de hidrógeno de espín polarizado, Kleppner y Greytak en el MIT y unos competidores de la Universidad de Amsterdam se propusieron crear uno; ni se les pasó por la cabeza cuán larga iba a ser la empresa, y menos que se les adelantarían los condensados de átomos *metálicos*.

No llegaría a la meta el primero, pero el grupo de Kleppner daría varios pasos fundamentales en el camino hacia los CBE, como lograr el enfriamiento evaporativo del hidrógeno de espín polarizado en 1987, proeza que los grupos que trabajaban con átomos alcalinos sólo repetirían siete años después. Para 1991 el grupo de Kleppner y Greytak había llegado a una temperatura y una densidad que sólo triplicaban las necesarias para que se formase un condensado (los átomos alcalinos multiplicaban todavía por un millón esos parámetros). Pero ciertas malignas propiedades del hidrógeno se interpusieron en ese punto del camino; entre otras cosas, era difícil observar las propiedades críticas del gas que deberían confirmar que se había creado un condensado. Los gases de átomos alcalinos toleran la luz visible y los procedimientos corrientes con láser. Con el hidrógeno hay que usar luz ultravioleta, y eso es más delicado.

Kleppner recibía en junio de 1998 una llamada de teléfono, avanzada la noche, de dos de sus alumnos de ahora, que le decían que fuese al laboratorio. ¡Por fin se había observado un condensado de Bose-Einstein de hidrógeno! Un mes después, en un congreso celebrado en la italiana Varenna, anunciaba el logro de su grupo. Los expertos reunidos allí —compañeros, rivales y antiguos alumnos— brindaron al nuevo y orgulloso padre una larga ovación.

terle y Pritchard y el de Takahiro Kuga y colaboradores, de la Universidad de Tokyo.

Que se amplifiquen ondas de materia no quiere decir que con la energía del amplificador se cree materia, sino que se engendra en el CBE un pequeño impulso de láser de átomos que se amplifica cuando más átomos del condensado siguen su naturaleza bosónica y se le incorporan. Una simultánea dispersión de la luz de un láser de bombeo consigue que el momento y la energía se conserven como es debido.

El grupo del MIT vio que era posible amplificar ondas de materia de esa forma cuando, también en 1999, atacaron con un láser de hidrógeno uno de sus condensados, con figura de cigarro: se quedaron de una pieza al observar que a 45 grados del rayo saltaban cúmulos de átomos, mientras de los extremos del "cigarro" salían haces de luz. Era una forma de dispersión, la superradiancia, en la que actúa una amplificación rudimentaria.

Es en estos procesos donde el comportamiento de los condensados se asimila al de la luz, en intenso contraste con su comportamiento líquido en cuanto superfluidos. Un campo extraordinariamente activo de la óptica en los últimos diez años ha sido el que trata de las interacciones de la luz consigo misma, la óptica no lineal. Los efectos no lineales adquieren interés creciente en las fibras ópticas, que funcionan con las mayores velocidades de transmisión de datos.

Lo normal es que la luz apenas interaccione consigo misma; se requieren intensidades altas o medios especiales para obtener esos efectos no lineales. Las interacciones débiles de los átomos en los condensados los producen automáticamente; son, pues, ideales para estudiar tales procesos. La simple imagen clásica en la que los átomos son partículas que chocan como si fuesen canicas no sirve de nada cuando hay que explicar los resultados que se observan en estos experimentos.



5. LA "MOLECULA TRILOBITES" de dos átomos de rubidio, mil veces mayor que una molécula diatómica ordinaria, se crearía dentro de un condensado gracias a una excitación por láser apropiada. Las curvas doradas indican la densidad que se le calcula a la nube de electrones que forma el enlace. La bola lila es uno átomo; el otro está tapado por las "torres gemelas". Varios grupos han producido moléculas ultrafrías más corrientes en los condensados con técnicas de láser parecidas, pero todavía no se ha visto un condensado de moléculas.

¿Agujeros negros de cartón piedra?

Una de las maravillas de la óptica no lineal es frenar la luz en una medida asombrosa. Las ondas electromagnéticas —las de radio, los rayos X, la luz— se mueven por el vacío a la velocidad que no puede sobrepasarse: unos 300.000 kilómetros por segundo. La luz no avanza tan deprisa en un medio material; en el agua se mueve a unos tres cuartos de la velocidad máxima, y a unos dos tercios en un vidrio corriente. Lene Vestergard Hau, del Instituto de Ciencia Rowland, dejó la velocidad de la luz en sólo 17 metros por segundo. El grupo de Ketterle comunicaba en un artículo reciente que habían observado luz que se movía por un condensado a un metro por segundo, a paso de hombre. No hace falta un condensado para producir esos efectos, pero el frío tan intenso de los gases condensados tiene propiedades ideales para inducir los ejemplos más extremos.

Ulf Leonhardt y Paul Piwnicki, del Instituto Real de Tecnología de Estocolmo, expusieron en 1999 una idea apasionante: que la luz lenta que se propaga en un condensado cerca de un vórtice podría remedar lo que ocurre cerca de los agujeros negros rotatorios. Por ejemplo, la luz sería arrastrada adentro del núcleo del vórtice, sobre todo si el haz se mueve "contra la corriente" del flujo rotacional.

Peter Zoller, Ignacio Cirac y sus compañeros de la Universidad de Innsbruck muestran, en trabajos inéditos, que sería posible construir con la capacidad técnica actual modelos *sónicos* de agujeros negros, es decir, agujeros negros de cartón piedra en los que el sonido haría las veces de la luz. Sus cálculos indican que esos agujeros negros estallarían en una erupción de fonones, los cuantos de las ondas sonoras. Esas explosiones serían análogas a la evaporación de los agujeros negros gravitatorios microscópicos por medio de la radiación de Hawking, una mezcla térmica de partículas que, según se predice, ha de emitirse como consecuencia de efectos cuánticos.

En agosto de 2000, Wayne Hu y su grupo de la Universidad de Princeton conjeturaban que la aún no detectada "materia oscura" que constituye quizás el 90 por ciento del universo podría existir en la forma de un condensado de Bose-Einstein de partículas de masa sumamente pequeña que llenaría el espacio. Esa forma condensada de materia oscura resolvería, dicen, algunos de los problemas que aquejan a las cosmologías de la "materia oscura fría", por lo demás satisfactorias. Si esta notable hipótesis resultase cierta, los gases más fríos del universo podrían ser los más abundantes.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ATOM LASERS. Kristian Helmerson, William D. Phillips, Keith Burnett y David Hutchinson, en *Physics World*, vol. 12, núm. 8, págs. 31-36, agosto de 1999.

BOSE CONDENSATES MAKE QUANTUM LEAPS AND BOUNDS. Yvan Castin, Ralph Dum y Alice Sinatra, en *Physics World*, vol. 12, núm. 8, págs. 37-42, agosto de 1999.

EXPERIMENTAL STUDIES OF BOSE-EINSTEIN CONDENSATION. Wolfgang Ketterle en *Physics Today*, vol. 52, núm. 12, págs. 30-35; diciembre de 1999.

Mecánica cuántica de los condensados de Bose-Einstein

El largo camino recorrido desde el ^{4}He líquido hasta los gases diluidos de átomos alcalinos

Arturo Polls, Jordi Boronat y Ferran Mazzanti

El de 1995 fue un año importante en la historia de la física. Se creó el primer condensado de Bose-Einstein, una nueva situación de la materia donde se someten los átomos a bajísimas temperaturas y quedan atrapados en un solo estado cuántico. Tal proeza se logró, a partir de un gas diluido de átomos de rubidio, en el JILA de Boulder, un laboratorio estatal compartido por la Universidad de Colorado. Desde entonces se han publicado más de mil artículos sobre el tema y se han constituido más de 20 grupos experimentales distribuidos por todo el mundo.

En los experimentos se consigue que un conjunto de átomos, que oscilan entre los 2000 de los ensayos iniciales y los 10 millones de los ejemplos recientes, queden confinados en una región del espacio a muy baja temperatura ocupando casi todos ellos el mismo estado, el de menor energía. En virtud de esa condensación, pierden su identidad individual, comparten la misma función de onda y se comportan como si fuesen un solo "superátomo".

Se pierde la identidad individual cuando domina el comportamiento ondulatorio sobre el corpuscular. Para que se manifieste el carácter ondulatorio de la materia, la longitud de onda asociada a los átomos tiene que ser del orden de la distancia entre ellos. La longitud de onda de De Broglie, que podemos asociar a los átomos en su movimiento, es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura. Por tanto, si se quiere mantener la condición de gas diluido y evitar así la excesiva frecuencia de los choques entre los átomos, se requieren temperaturas muy bajas. No suelen éstas darse espontáneamente en el universo. Hay que provocarlas en el laboratorio. Hablamos de temperaturas del orden de los nanokelvin (10^{-9} K), nueve órdenes de magnitud inferiores a la temperatura de la transición superfluida del ^{4}He líquido. Con el de la temperatura, otro problema técnico no menor es el de confinar los átomos sin destruir la estabilidad del condensado.

La observación del fenómeno de condensación de Bose-Einstein (CBE) en los gases diluidos de átomos alcalinos ha requerido, en consecuencia, el desarrollo de refinadas técnicas de enfriamiento, basadas en la utilización de rayos láser. Por los métodos desarrollados para enfriar y atrapar átomos con láser Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji y William D. Phillips recibieron en 1997 el premio Nobel de física.

Una vez logrado el primer enfriamiento con láser, se procede a su confinamiento. Este se realiza mediante un campo magnético que actúa sobre el espín de cada átomo y crea un pozo de potencial que los atrapa.

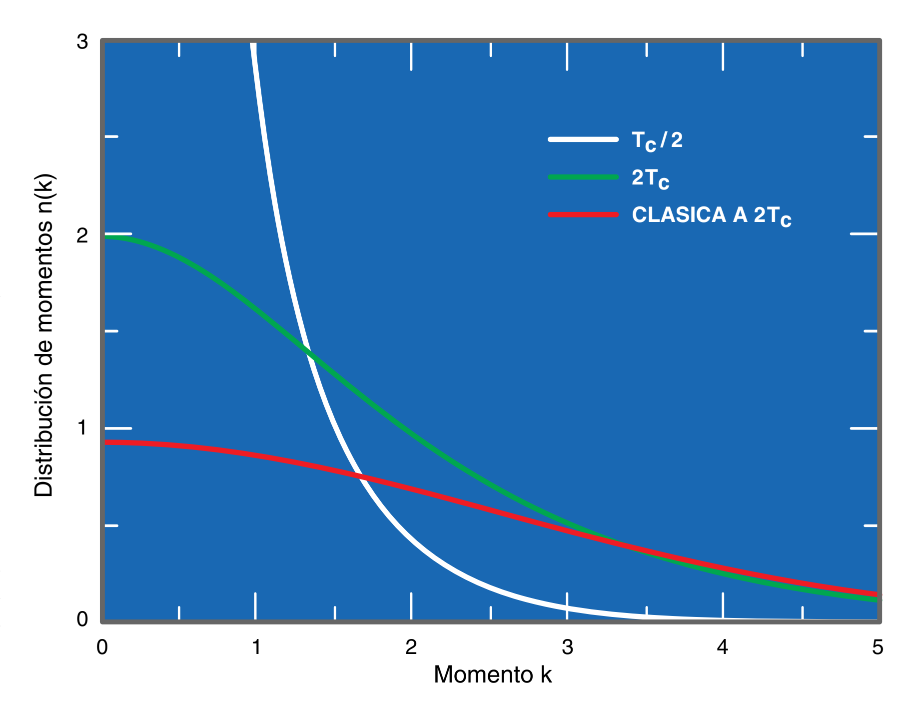
En una segunda etapa se continúa el enfriamiento por evaporación. Se trata de dejar escapar a los átomos más energéticos, a la manera en que se enfría una taza de café. Conviene resaltar que no hay ningún aparato de la criogenia tradicional involucrado en el experimento. Todos los dispositivos, que ocupan el reducido espacio de una mesa de escritorio, se mantienen a la temperatura de laboratorio, salvo la pequeña nube atómica donde se produce la condensación, cuyo tamaño característico se sitúa alrededor de los 10.000 angstrom. (1 Å es la diezmilmillonésima de metro.)

La bajísima densidad del sistema facilita su estudio teórico y permite calcular sus propiedades con precisión. Comparada con la separación media entre las partículas, la distancia de interacción característica es pequeña; el sistema se asemeja a un gas de esferas duras de diámetro mucho menor que la distancia media entre átomos. Para hacernos una idea, en el ejemplo del rubidio podemos tomar como diámetro típico ≈ 60 Å, unas veinte veces menor que la distancia media entre los átomos.

En el problema interviene otra magnitud, el tamaño del pozo de potencial que suele tomarse como unidad de longitud en la descripción de estos sistemas. Aunque depende del caso considerado, su valor se cifra en torno a los 10.000 Å. (Para una exposición detallada del fenómeno en gases diluidos de átomos alcalinos puede consultarse el artículo escrito, en el número de mayo de 1998 de *Investigación y Ciencia*, por los propios autores del primer experimento con éxito Eric A. Cornell y Carl E. Wieman.)

ARTURO POLLS, JORDI BORONAT y FERRAN MAZZANTI han venido trabajando sobre los condensados de Bose-Einstein desde ópticas complementarias. Polls, profesor de la facultad de física de la Universidad de Barcelona, investiga en la estadística del fenómeno. Boronat, docente en la Politécnica de Cataluña, dirige un grupo de trabajo sobre métodos de Monte Carlo para líquidos cuánticos. Mazzanti, profesor de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura La Salle, adscrita a la Universidad Ramón Llull de Barcelona, se dedica al estudio de la colisión inelástica de neutrones con líquidos cuánticos.

1. DISTRIBUCION de momentos de un gas ideal bosónico a temperaturas por encima y por debajo de la temperatura de transición T_c. A modo de comparación se muestra también la distribución de momentos del gas ideal clásico a temperatura $T = 2T_c$.



El interés por el fenómeno de la condensación de Bose-Einstein tiene una larga historia. Se remonta a 75 años atrás, cuando los físicos S. N. Bose y A. Einstein predijeron su existencia en un gas ideal cuántico sin interacciones.

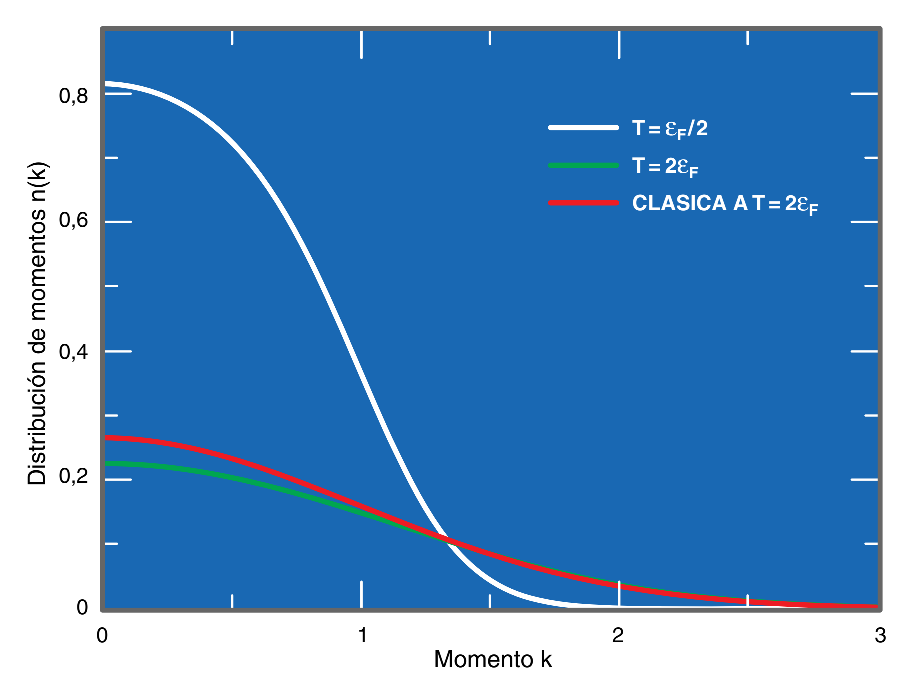
Un gas ideal de Bose queda caracterizado por la masa de las partículas que lo componen, la densidad y la temperatura. La presencia de efectos cuánticos se manifiesta a través del correcto tratamiento de la imposibilidad de distinguir entre tales partículas. Ante partículas indistinguibles podemos apreciar o un comportamiento fermiónico o un comportamiento bosónico. Cualquiera que sea, el comportamiento va asociado al espín de la partícula, siendo éste el momento angular inherente a la partícula en su sistema en reposo. Sin entrar en pormenores, hemos de saber también que las partículas elementales se dividen en bosones o fermiones, según sea su espín entero o semientero.

Ejemplos típicos de fermiones son los electrones, protones y neutrones, es decir, los constituyentes básicos de los átomos. El comportamiento de los fermiones se rige por el principio de exclusión de Pauli, que prohíbe que dos fermiones idénticos compartan el mismo estado cuántico. La aplicación de esta regla a la ubicación de los electrones en los distintos orbitales atómicos da cuenta de la tabla periódica y explica la propia estabilidad de la materia. En cambio, para las partículas con comportamiento bosónico, cuyo ejemplo por excelencia serían los fotones que constituyen la radiación electromagnética, no hay limitación en el número de ocupación de un mismo estado cuántico.

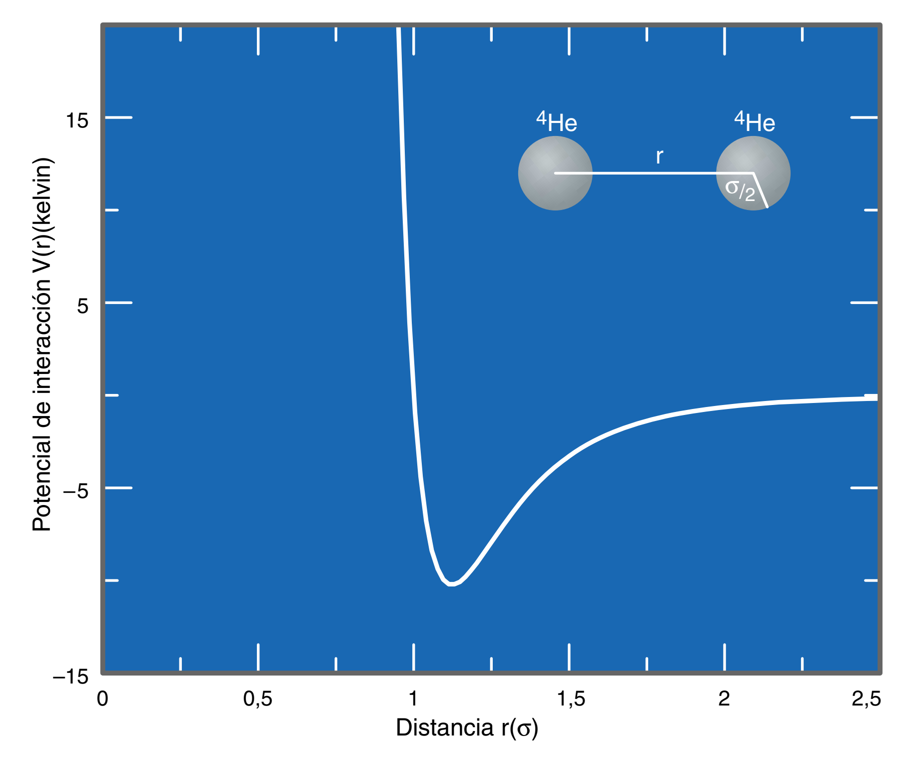
En el caso de un gas ideal, los estados cuánticos monoparticulares vienen caracterizados por el momento lineal, $\vec{p}$, que equivale al producto de la masa de la partícula por la velocidad, $m\vec{v}$, y cuya energía cinética asociada es $p^2/2m$. La energía total del sistema será suma de las energías cinéticas monoparticulares. A temperatura nula, y en su estado fundamental, todas las partículas ocupan el estado de momento cero, es decir, el estado de energía más baja.

En un sistema bosónico genérico, a la fracción de partículas, n_0, que ocupan el estado de momento cero se le llama fracción condensada. Su expresión formal, $n_0 = N_0/N$, constituye una medida de la condensación de Bose-Einstein en un sistema homogéneo, caracterizada por la ocupación macroscópica de un estado en el espacio de momentos.

De estas definiciones se desprende que el valor de n_0 para el gas ideal de bosones a temperatura cero es la unidad. En este sentido, la condensación de Bose-Einstein en un sistema homogéneo, como en el gas ideal o en el ^{4}He líquido, se carac-



2. DISTRIBUCION de momentos de un gas ideal fermiónico a temperaturas por encima y por debajo de la temperatura de Fermi ε_F (la temperatura de Fermi corresponde a la energía del último nivel ocupado, ε_F). A modo de comparación se muestra también la distribución de momentos del gas ideal clásico a temperatura $T = 2\varepsilon_F$.



3. POTENCIAL DE INTERACCION entre dos átomos de helio, dónde se observa la fuerte componente repulsiva a cortas distancias y la cola atractiva a largas distancias. La unidad de longitud es σ = 2,556 Å.

teriza de forma distinta que en el caso de los átomos alcalinos atrapados en trampas magnéticas, donde la CBE se manifiesta por una ocupación macroscópica de un estado espacialmente localizado.

Cuando la temperatura del gas ideal aumenta, la distribución de momentos, que indica la probabilidad de ocupación de cada estado de momento definido de un sistema en equilibrio térmico, no mantiene a todas las partículas en el estado de momento cero. Ahora la distribución minimiza la energía libre *F*, que es combinación de la energía, (*U*) y del producto de la temperatura por la entropía ($F = U - TS$).

La entropía (*S*), una medida del desorden en un sistema, es proporcional al logaritmo del número de estados microscópicos compatibles con determinado estado macroscópico del sistema. La entropía es cero a temperatura nula, porque no hay desorden; sólo existe un estado accesible, que es el estado fundamental.

A temperatura mayor que cero, y debido a la presencia del término entrópico, al sistema le resulta más rentable dejar algunas partículas fuera del estado de momento cero, ya que así aumenta su contribución, que, por ser negativa, hace disminuir la energía libre. A una temperatura dada, este argumento es válido para densidades menores que una densidad crítica. Para densidades superiores al valor crítico, la minimización de la energía libre se consigue situando las partículas adicionales en el estado de momento cero, iniciándose así el proceso de condensación. Alternativamente, para una densidad determinada se consigue llegar al régimen CBE disminuyendo la temperatura por debajo de un cierto valor crítico.

Antes de proseguir con las consideraciones termodinámicas, conviene conocer las condiciones para que se manifieste el comportamiento ondulatorio de la materia. Podemos partir de un suceso análogo, el de difracción óptica. Cuando la luz atraviesa una rendija, se observan fenómenos de difracción si la longitud de onda de la luz es del orden de la anchura de la rendija. Pero si, comparada con la anchura de la rendija, la longitud de onda es muy pequeña el fenómeno acontecido admite una interpretación corpuscular de la luz mediante fotones que viajan en trayectorias rectilíneas.

Se observan efectos cuánticos cuando la longitud de onda de De Broglie es del orden de la distancia entre las partículas. En cambio, asistiremos a un comportamiento clásico, newtoniano, cuando la longitud de onda de De Broglie es muy pequeña comparada con la distancia media entre las partículas. Pues bien, cuando la temperatura es alta, y disminuye la longitud de onda, la distribución de momentos de un gas ideal tiende a la distribución clásica de Maxwell-Boltzman, en forma de campana y con una amplitud que es proporcional a la temperatura. La energía cinética media por partícula asociada a esta distribución es 3/2 k*T*, donde k es la constante de Boltzman.

Por tanto, a cierta densidad, la temperatura crítica, por debajo de la cual aparece la fracción condensada, viene determinada por la condición de que la longitud de onda de De Broglie sea del mismo orden que la distancia media entre las partículas. La temperatura crítica, $T_c \propto \hbar^2 \rho^{2/3}/m$, aumenta con la densidad y disminuye con la masa.

En un gas ideal de bosones a una cierta densidad y a una temperatura por debajo de la temperatura crítica, la fracción condensada sigue la ley $n_0(T) = 1 - (T/T_c)^{3/2}$, donde T_c designa la temperatura crítica. Y no sólo se desarrolla una ocupación macroscópica del estado de momento cero, sino que el límite de la distribución de momentos al tender el momento a cero diverge de una manera inversamente proporcional al cuadrado del momento lineal.

El comportamiento de un gas ideal de fermiones difiere del caso bosónico: no puede haber dos fermiones ocupando el mismo estado. La distribución de momentos a temperatura nula corresponde a la llamada función escalón; se trata de una distribución que minimiza la energía respetando la naturaleza fermiónica de los constituyentes. Todos los momentos están ocupados hasta el denominado nivel de Fermi (k_F). La distribución de momentos viene caracterizada por la discontinuidad en la superficie de Fermi. Al aumentar la temperatura, los efectos estadístico-cuánticos desaparecen y las dos distribuciones, tanto la bosónica como la fermiónica, terminan por aproximarse a la distribución clásica.

Todos estos efectos dependen de una manera muy estricta de la dimensionalidad del sistema, por la sencilla razón de que la densidad de estados cuánticos por unidad de energía es función del número de dimensiones. Por ejemplo, en un gas ideal de bosones en una y dos dimensiones, no hay ocupación macroscópica del estado de momento cero a tempera-

tura finita; la temperatura crítica es nula. Ahora bien, a temperatura cero todas las partículas se encuentran en el estado de momento cero, configuración que obviamente minimiza la energía interna. Sin embargo, la ausencia de fracción condensada a temperatura finita no implica la desaparición de los efectos cuánticos. La distribución de momentos a bajas temperaturas continúa siendo muy distinta de la distribución clásica de Maxwell.

Todos estos fenómenos se han intentado comprobar en el helio, elemento del cual existen dos isótopos estables en la naturaleza. Simbolizados por ^{4}He y ^{3}He, tienen el mismo número de protones y diferente de neutrones; el núcleo del primero consta de dos protones y dos neutrones, en tanto que el del ^{3}He aloja dos protones y un neutrón. En ambos isótopos los efectos cuánticos se manifiestan de forma espectacular, originando así su extraño comportamiento a temperaturas próximas al 0 absoluto (–273 ºC).

Nos muestra la experiencia diaria que, a temperaturas altas, las sustancias están en fase gaseosa. Cuando baja la temperatura, el gas pasa a fase líquida y, si la temperatura continúa descendiendo, se transforma en un sólido. La interpretación microscópica atribuye el fenómeno a la disminución de la energía cinética media de sus constituyentes, que guarda relación directa con la temperatura. La movilidad de las partículas disminuye al bajar la temperatura y, en el cero absoluto, todas las sustancias estarían en la fase sólida.

Pues bien, con ninguno de los dos isótopos del helio ocurre tal cosa. Al disminuir la temperatura los isótopos continúan en fase líquida. Para pasarlos a fase sólida se requiere una presión externa notable, del orden de 20 atmósferas para el ^{4}He y de 35 atmósferas para el ^{3}He. Que el helio no solidifique es un efecto cuántico macroscópico. Se debe, en primer lugar, a la débil atracción que existe entre sus átomos y, en segundo lugar, a una razón más sutil. Cuando afirmamos que la temperatura es una medida directa de la energía cinética, debiéramos hacer una salvedad. Tal proposición no resulta del todo cierta en situaciones donde importan los efectos ondulatorios; dicho con propiedad, allí donde la posición y el momento de los átomos no pueden especificarse simultáneamente con precisión infinita, esto es, cuando se ha de tomar en consideración el principio de indeterminación de Heisenberg.

Una partícula localizada en una región del espacio posee siempre una incertidumbre en su momento y, por tanto, una energía cinética media mínima, la así llamada energía del punto cero. En el helio basta esa energía, junto con la ligera masa de los átomos, para contrarrestar la débil atracción entre éstos que intenta fijarlos en sus posiciones de equilibrio. Debido a este hecho, el líquido no solidifica.

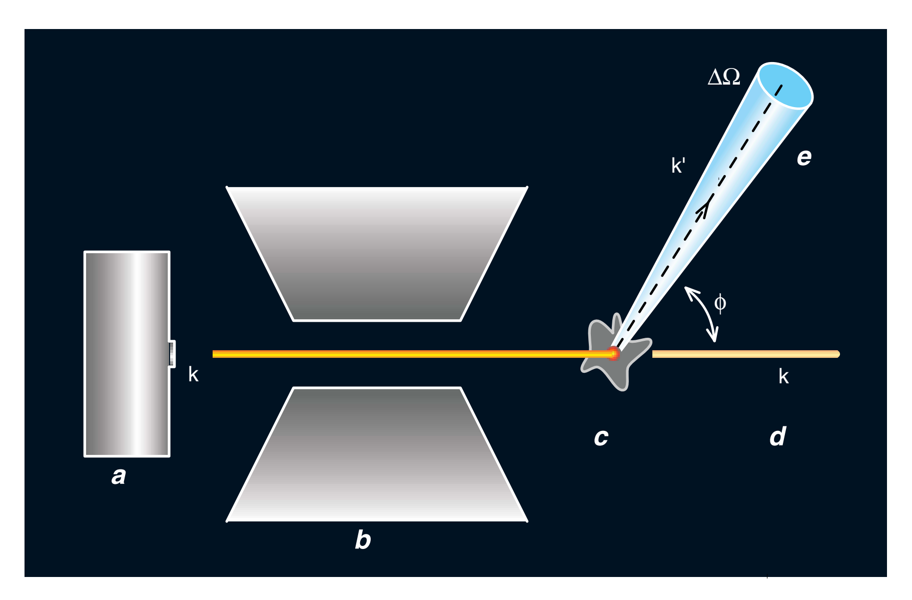
No acaban ahí las sorprendentes propiedades de estos isótopos. Por debajo de cierta temperatura se convierten en superfluidos, capaces de discurrir por capilares estrechísimos sin un gradiente de presión. Esta transición ocurre a una temperatura de 2,2 kelvin en el ^{4}He y a una temperatura tres órdenes de magnitud inferior, 2,6 milikelvin, en el ^{3}He. La superfluidez del ^{4}He fue experimentalmente observada en 1938 por Pyotr Kapitza. Debido a las dificultades técnicas para conseguir bajas temperaturas, la superfluidez del ^{3}He no se logró hasta 1975 cuando Lee, Osheroff y Richardson realizaron los primeros experimentos concluyentes. Ambos descubrimientos merecieron el premio Nobel, el del ^{4}He en 1978 y el del ^{3}He, mucho más tarde, en 1996.

¿Qué tiene que ver todo esto con la condensación de Bose-Einstein? Mucho. Los átomos de ^{4}He se comportan como bosones y los de ^{3}He como fermiones. No sólo las partículas elementales tienen un carácter bosónico o fermiónico definido, sino que se trata también de una propiedad de los átomos.

En la descripción mecánico-cuántica de los constituyentes fundamentales de la materia, los quarks y los leptones (electrón incluido) se caracterizan por tener espín 1/2, semientero; son, por tanto, fermiones. Por su parte, los bosones fundamentales comprenden el fotón, responsable de la interacción electromagnética, los tres bosones masivos mediadores de la interacción débil, los gluones, que transmiten la interacción fuerte entre hadrones, y los gravitones, encargados de la interacción gravitatoria.

El carácter bosónico o fermiónico de las otras partículas observadas y de los propios átomos es, en general, compuesto. Aunque la explicación pueda resultar un tanto complicada, la regla es muy simple. Las partículas compuestas por tres quarks, como los protones y neutrones, poseen espín semientero y se comportan como fermiones, mientras que las partículas integradas por dos quarks, como los mesones, tienen espín entero y se comportan como bosones. La regla resulta, a su vez, válida para los átomos.

El átomo de ^{4}He formado por un número par de componentes de carácter fermiónico se comporta como un bosón, en cambio el átomo de ^{3}He se comporta como un fermión. Se trata de una distinción importante cuando se estudia un conjunto de estos átomos, porque impone severas restricciones en su comportamiento y en su descripción mecánico-cuántica. En úl-



4. ESQUEMA DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL utilizado para realizar dispersión inelástica de neutrones: (*a*) fuente de neutrones; (*b*) selector de velocidades; (*c*) muestra de helio; (*d*) neutrones transmitidos; (*e*) neutrones que han colisionado con el blanco y han cambiado su momento (*k'*).

Nociones clave: Sección eficaz y aproximación de impulso

La sección eficaz diferencial describe la difusión inelástica de neutrones en sistemas como el ^{4}He líquido. Se mide contando el número de neutrones de energía fija difundidos en un cierto ángulo sólido Ω:

$$\frac{d^2\sigma}{dE\,d\Omega} = \frac{\sigma_{tot}}{4\pi}\,\frac{k_i}{k_f}\,S(q,E).$$

Esta fórmula tiene tres términos bien diferenciados: σ_{tot}, que es la sección eficaz total del neutrón con un átomo de ^{4}He aislado, los factores cinemáticos que contienen el momento inicial $\vec{k}_i$ y final $\vec{k}_f$ del neutrón difundido y, por último, la información del sistema que estamos explorando con la sonda neutrónica y que está incluida en la función de estructura dinámica, $S(q,E)$. La función de estructura dinámica depende del momento $\vec{q} = \vec{k}_f - \vec{k}_i$ y de la energía $E = (k_f^2 - k_i^2)/(2m_n)$ transferidos al sistema.

Cuando el momento transferido es muy grande, es decir, cuando la longitud de onda asociada es pequeña comparada con la distancia entre los átomos, el proceso de difusión puede considerarse como si ocurriera con átomos libres con una cierta distribución de momentos. La función de estructura se expresa como la suma de las contribuciones individuales de cada átomo, teniendo en cuenta la distribución de momentos y la conservación de energía y momento:

$$S(q,E) = \frac{1}{(2\pi)^3\rho}\int d^3k\,n(k)\,\delta\left[E - \left(\frac{\hbar^2(\vec{k}+\vec{q})^2}{2m} - \frac{\hbar^2k^2}{2m}\right)\right].$$

Esta fórmula, conocida como aproximación de impulso, expresa matemáticamente el hecho de que un neutrón choca con un átomo de la muestra que tiene un momento $\vec{k}$, le comunica un momento $\vec{q}$ grande y, como consecuencia, el átomo adquiere una energía cinética $\hbar^2(\vec{k}+\vec{q})^2/2m$, siendo m la masa del átomo de helio. En esta aproximación se supone que el átomo de helio, que no detectamos, escapa del sistema sin interaccionar con los otros átomos.

Normalmente, para momentos altos, en lugar de $S(q,E)$ se suele mostrar el perfil de Compton:

$$J(Y,q) = \frac{\hbar^2 q}{m}\,S(q,E),$$

donde $Y = (E - \hbar^2 q^2/(2m))\,(m/(\hbar^2 q))$. Bajo ciertas condiciones, por ejemplo en el caso de que sea válida la aproximación de impulso, esta función depende sólo de la variable Y. En este caso, hablamos de escalado en Y (*Y-scaling*) de la función de estructura dinámica.

tima instancia, explica el dispar comportamiento de uno y otro isótopo. Esto es cierto en tanto en cuanto el experimento que realicemos aborde al átomo como un todo y no entre a explorar sus componentes individuales.

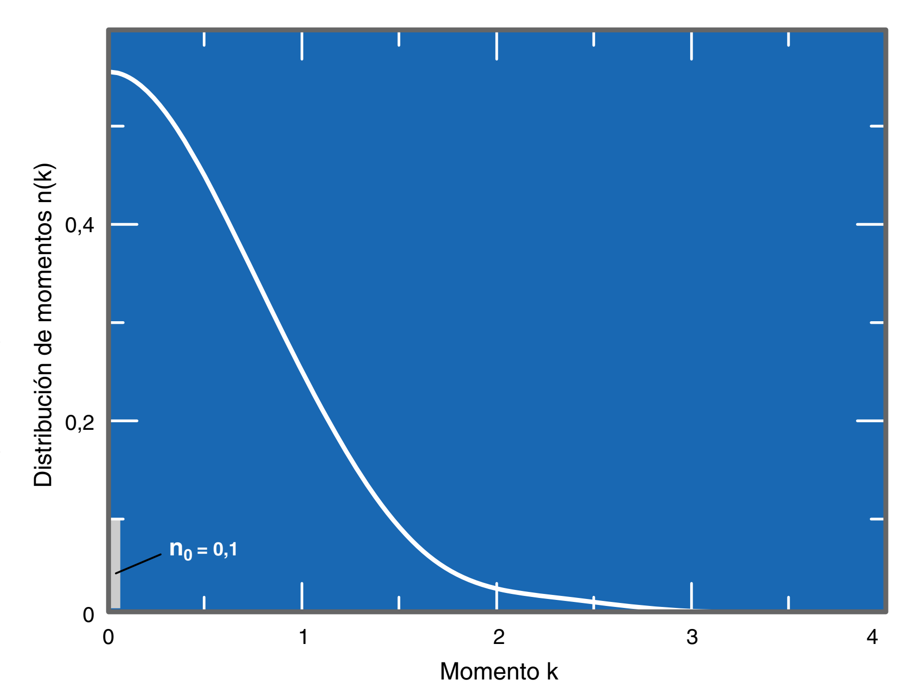
Una vez aceptado que el ^{4}He líquido es un sistema bosónico, podemos estimar la temperatura crítica por debajo de la cual se produce la CBE. Basta con volver a la expresión obtenida para el gas ideal de bosones, aunque con la masa de los átomos de ^{4}He y la densidad del líquido correspondiente. El resultado de esta estimación es $T_c \approx 3{,}13$K que resulta ser muy cercana a la temperatura por debajo de la cual empieza a manifestarse el fenómeno de la superfluidez en el ^{4}He. Fritz London observó esa coincidencia ya en 1938, año en que se estableció el comportamiento superfluido del ^{4}He, lo que permitió especular con la posibilidad de que la transición superfluida estuviera asociada a la condensación de Bose-Einstein.

Comenzó entonces una tenaz carrera hacia la identificación del fenómeno CBE en ^{4}He líquido a baja temperatura. ¿Existe realmente la condensación de Bose-Einstein en ^{4}He líquido? ¿Cómo se manifiesta? ¿Cuál es la fracción condensada a temperatura nula y cuál es su dependencia con la temperatura? ¿Qué relación existe entre la CBE y la superfluidez? En la resolución de esas y otras cuestiones similares se han afanado físicos teóricos y experimentales durante los 70 últimos años.

Antes de proseguir, aclaremos que la condensación de Bose-Einstein no es una condición ni necesaria ni suficiente para la existencia de superfluidez en un sistema bosónico. Puede darse superfluidez sin que se produzca CBE; por ejemplo, en dos dimensiones. Y presentarse la CBE sin superfluidez; por ejemplo, en el gas ideal de bosones en tres dimensiones.

Se trata, empero, de una vieja controversia. Lev Landau, que recibió el premio Nobel en 1962, dio una explicación para la superfluidez sin necesidad de suponer la existencia de CBE, sino advirtiendo que los estados excitados del sistema son difícilmente accesibles cuando el ^{4}He fluye a lo largo de un capilar. Por lo tanto, la viscosidad que mide la pérdida de energía del sistema en forma de energía térmica, producida al poblarse estados excitados, disminuye notablemente hasta merecer el calificativo de superfluido. Por debajo de cierta velocidad crítica, estas excitaciones resultaban inaccesi-

5. DISTRIBUCION DE MOMENTOS de ^{4}He líquido a temperatura cero. Con trazo grueso se muestra la señal procedente del condensado de Bose-Einstein.



bles y, por tanto, el sistema fluía sin perder energía cinética.

No ocurre así con el gas ideal bosónico, cuyo espectro de excitación es parabólico y nula, por tanto, la velocidad crítica. Para calcular el espectro de excitación del ^{4}He que Landau determinó de forma fenomenológica, hay que llevar la mecánica cuántica hasta sus últimas consecuencias. En especial, en lo concerniente a su naturaleza bosónica. En el ^{4}He, superfluidez y condensación de Bose-Einstein comparten, en efecto, un mismo origen, la naturaleza bosónica de sus átomos. Está bien establecido, experimental y teóricamente, que los dos fenómenos aparecen en el ^{4}He líquido a la misma temperatura crítica.

Además de la estadística, en el espectro de excitación influye también la interacción entre los átomos. El ^{4}He líquido dista mucho de ser un gas ideal. Sus átomos interactúan entre sí por medio de un potencial que depende de la distancia que los separa; a cortas distancias se produce una fuerte repulsión y, a distancias grandes, una débil atracción. Predomina tanto la característica repulsiva, que los átomos pueden considerarse, en una primera aproximación, esferas duras de unos 2,6 Å de diámetro.

Para describir tal interacción se puede emplear el potencial de Lennard-Jones. Este es fuertemente repulsivo a cortas distancias y ligeramente atractivo a distancias mayores. Formalmente, $V(r) = 4\varepsilon\,[(\sigma/r)^{12} - (\sigma/r)^6]$, donde $\varepsilon = 10,22$ K define la profundidad del potencial y $\sigma = 2,556$ Å la escala de longitud.

La acción atractiva se debe a la polarización que sufre la nube electrónica de los átomos. Así, aunque éstos no tienen carga neta, existe una atracción débil entre las dos distribuciones de carga polarizadas. Por ser idéntica la distribución electrónica en ambos isótopos, la interacción no distingue entre ellos; es la misma tanto para una pareja de átomos de ^{4}He como de ^{3}He. Las diferencias que se observan en su comportamiento resultan de la diferencia de masa y, sobre todo, de la diferente estadística, es decir, del carácter bosónico o fermiónico de dichos isótopos.

El potencial de ionización del helio, la energía mínima necesaria para arrancar un electrón, es de 24,56 electronvolt. Para que el átomo pase de su estado fundamental a su primer estado excitado se requieren 20 electronvolt. En ambos casos, se trata de las energías mayores de toda la tabla periódica. Valores que resultan asombrosos si los comparamos con los de las energías importantes en la física del helio, que se sitúan en torno a unos pocos kelvin. (Recuérdese que 1 electronvolt ≈ 11.000 kelvin.)

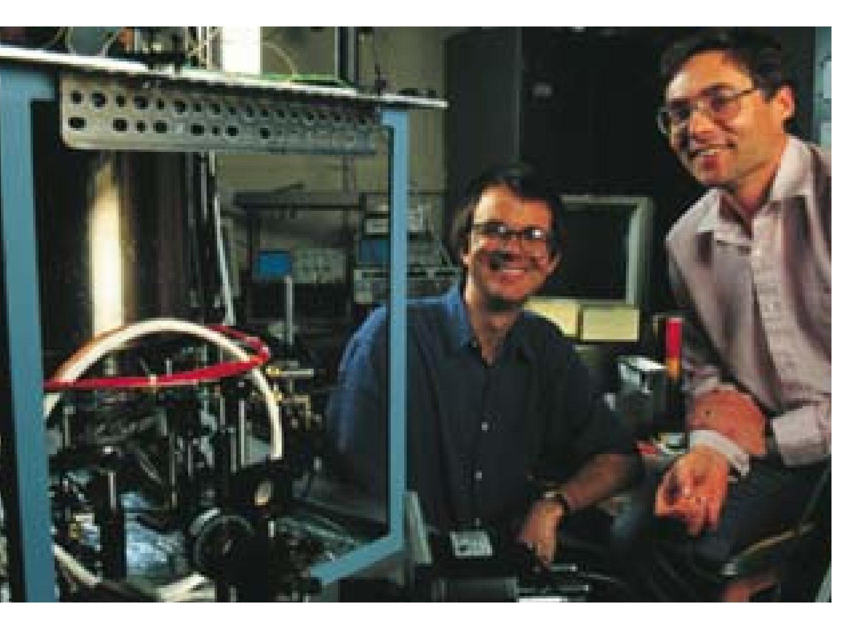
Para avanzar en la explicación, conviene entender bien el concepto de densidad de saturación. A esta densidad, la energía de ligadura presenta un mínimo y la presión es nula. Pensemos en el líquido contenido en un cilindro limitado por un émbolo; para mantener el líquido a la densidad de saturación, no hay que aplicar fuerza sobre el émbolo.

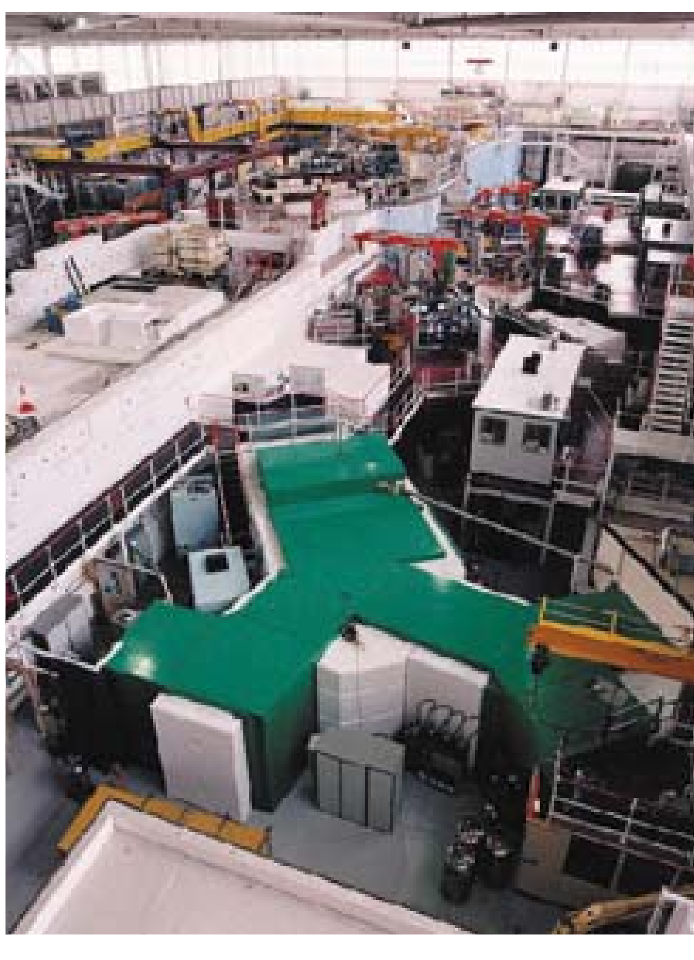
En el ^{4}He líquido, la energía de ligadura por átomo, a una densidad de saturación, ρ, de $0,365\sigma^{-3}$, resulta ser de 7,17 K; en cambio para el ^{3}He, la densidad de saturación es un poquito menor, $\rho = 0,273\sigma^{-3}$, y la energía de ligadura 2,5 K. Esta energías coinciden con los potenciales químicos para tales densidades y se identifican con la energía necesaria para arrancar un átomo del sistema. Para una densidad dada, la menor masa del átomo de ^{3}He se traduce en una mayor movilidad y, por tanto, una energía de ligadura y una densidad de saturación menores.

¿Cuál es el valor de la fracción condensada en el ^{4}He líquido? ¿Es del 100 % como en el gas ideal? La determinación experimental de la fracción condensada está asociada con la medida de la distribución de momentos, ya que ésta mide la ocupación de los diversos estados de momento fijo y la condensación se produce cuando se ocupa macroscópicamente el estado de momento cero. Pero, ¿podemos medir la distribución de momentos del ^{4}He? A mediados de los años sesenta se propuso medir la distribución de momentos del helio líquido mediante difusión inelástica de neutrones.

Actualmente, los cálculos más fiables predicen una fracción condensada a temperatura nula entre el 8 % y el 10 % y una distribución de momentos fuera del condensado que no sigue una curva gaussiana. La cola en la distribución de momentos produce una energía cinética alrededor de los 14 kelvin. De ello se desprende que la energía de ligadura del ^{4}He líquido es la consecuencia de una fuerte cancelación entre la energía potencial (≈–21 K) y la energía cinética.

El ^{4}He líquido es un sistema muy correlacionado, donde los átomos tienen poco espacio para moverse en libertad y colisionan sin cesar. Basta, para ratificarlo, comparar el volumen que cada átomo tiene a su disposición, volumen que se obtiene del inverso de la densidad ($V = 1/\rho$), con el "volumen" de cada átomo, estimado mediante el potencial de interacción.





6. LOS LABORATORIOS dedicados al estudio de la condensación de Bose-Einstein son de características muy distintas dependiendo de si trabajan con gases alcalinos diluidos o bien con ^{4}He. En la fotografía superior observamos la pequeña escala de los dispositivos utilizados para atrapar y enfriar gases alcalinos. Junto al equipo experimental, aparecen los dos científicos que consiguieron por primera vez observar el condensado de Bose-Einstein (E. Cornell, a la izquierda; C. Wieman, a la derecha). En la fotografia de la derecha, aparece una de las salas del Rutherford Appleton Laboratory, en Gran Bretaña, especializado en difracción de neutrones. A pesar de que los dos laboratorios estudian un mismo fenómeno físico, la diferencia de escala entre ambos es bien patente.

Para ello se asocia el átomo a una esfera dura (de radio $R \approx 1{,}3$Å y, por tanto, volumen $V_{He} = 4\pi R^3/3$). Una relación V_{He}/V de 0,2 resulta grande, incluso comparada con la materia nuclear, que esperamos encontrar en el interior de los núcleos atómicos. En efecto, tomando una densidad de saturación de materia nuclear ρ_{NM} equivalente a 0,17 nucleones por fentómetro cúbico, y un tamaño del nucleón de radio igual a unos 0,4 fentómetros (1 fentómetro es la cienmilésima de angstrom), se obtiene una relación V_{NM}/V igual a 0,05, unas cuatro veces menor que en el caso del ^{4}He líquido.

Uno de los objetivos principales de la dispersión inelástica de neutrones es la determinación de la distribución de momentos del líquido; para el ^{4}He en particular, se trata de detectar y medir la fracción condensada. Para estudiar la estructura atómica, la física de la materia condensada halla una sonda excelente en los neutrones. Debido a su carga nula, estas partículas no "sienten" a los electrones, sino que interaccionan, por medio de la fuerza fuerte, con el núcleo de los átomos. Además el rango de energías y momentos de los neutrones que se utilizan como proyectiles, permite explorar todo el espectro de excitación, desde las excitaciones colectivas de baja energía hasta los grados de libertad individuales.

Resumiendo, un típico experimento de difusión inelástica de neutrones procede como sigue. Se manda un haz monocromático de neutrones contra una muestra de helio líquido. Debido a la débil interacción entre los neutrones y los átomos de la muestra, la mayoría de aquéllos atraviesan ésta sin verse afectados; mientras que el resto sufre desviaciones de su trayectoria inicial al interaccionar con los átomos de helio. Los detectores, ubicados a determinada distancia de la muestra, miden la velocidad y el ángulo de desviación de los neutrones difundidos. Mediante relaciones cinemáticas sencillas, basadas en la conservación del momento y la energía, se puede calcular el momento $\vec{q}$ y la energía E transferidos a la muestra.

Guiados por los mismos principios se han realizado experimentos en otros campos donde se manipulan sondas y blancos diferentes, así como escalas de energía y longitud completamente distintas. Por ejemplo, se ha recurrido a la dispersión Compton de rayos X de varias decenas de kiloelectrovolt para estudiar la distribución de momentos en átomos y sólidos, y se ha utilizado la difusión profundamente inelástica de electrones de varios gigaelectronvolt para investigar la distribución de quarks en el interior de un nucleón.

En la difusión neutrónica se detectan sólo los neutrones difundidos y se calcula el número de neutrones que han depositado un cierto momento y energía en la muestra en relación con el flujo inicial de neutrones, es decir, se mide la sección eficaz. (La sección eficaz permite obtener información sobre el espectro de excitación de la muestra activada por la sonda.).

La longitud de onda de los neutrones incidentes es muy grande comparada con el alcance de la interacción fuerte, responsable de la interacción entre los neutrones y el núcleo de los átomos. Bajo estas condiciones, la sección eficaz es proporcional a la fun-

ción de estructura dinámica del sistema, que mide la respuesta del sistema cuando éste absorbe un cierto momento y energía. Si el momento transferido adquiere un valor alto, es decir, si su longitud de onda asociada es pequeña comparada con la distancia entre los átomos, cada átomo actúa de manera independiente, sin que se produzcan efectos de interferencia entre centros difusores (los átomos de la muestra). Cuando tal hecho sucede, se obtiene la intensidad de la función de estructura dinámica, para un cierto momento y energía transferidas al sistema, mediante la suma de la contribución individual de cada átomo, teniendo en cuenta su distribución de momentos y la conservación de energía y momento.

En términos técnicos, la suma aludida puede expresarse por medio de la fórmula conocida como *aproximación de impulso*, una integral donde interviene la distribución de momentos y la función δ-Dirac que garantiza la conservación de la energía. En términos físicos nos indica que un neutrón golpea a un átomo de la muestra que tiene momento $\vec{k}$, le comunica un momento $\vec{q}$ grande y, como consecuencia, el átomo adquiere una energía cinética $\hbar^2(\vec{k} + \vec{q})^2/2m$, escapando sin interaccionar con los otros átomos.

Se supone, pues, que las energías cinéticas involucradas son tan altas que permiten despreciar las interacciones del átomo golpeado por el neutrón con los otros átomos. (La verdad es que tales interacciones de estado final, así se llaman, no pueden despreciarse del todo.) Si todas las partículas estuviesen en el estado $\vec{k} = 0$, la función de estructura dinámica del sistema sería un simple pico de anchura cero y altura infinita.

Si la fracción condensada no es nula debería aparecer un pico en la sección eficaz situado a una energía $E = \vec{q}^{\,2}/2m$ y con una intensidad proporcional a la fracción condensada, además de la contribución del resto de momentos. En los primeros experimentos no se observaba la presencia de este pico, pero su ausencia se atribuyó al escaso momento transferido, razón por la cual no se cumplían las condiciones para la validez de la aproximación de impulso.

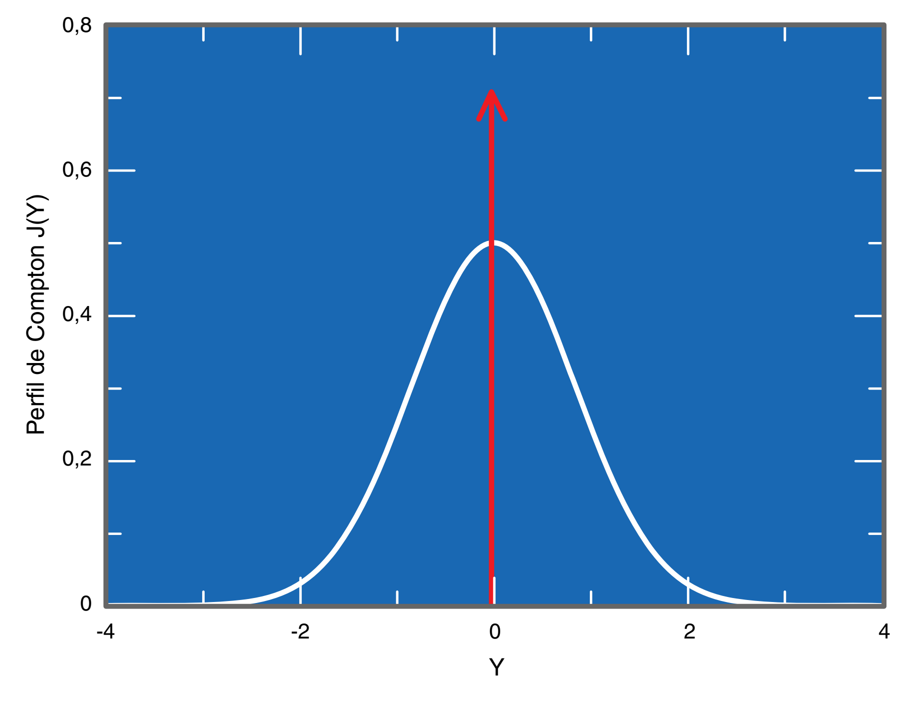
Empezó así un arduo trabajo experimental para aumentar el rango de momento transferido, elaborar una estadística razonable y disponer de detectores con buena resolución. A finales de los ochenta e inicios de los noventa se habían conseguido esos objetivos técnicos. Pero aun así no pudo determinarse la fracción condensada, ya que al estudiar los resultados experimentales para momentos transferidos altos no se observó el pico correspondiente a la fracción condensada predicho por la aproximación de impulso.

La explicación de este fracaso radica en el ensanchamiento del pico, causado por un doble motivo: las limitaciones de los detectores y las interacciones de estado final entre el átomo arrancado y el resto de los átomos. De ahí que el análisis de los resultados sólo pudiera dar una medida indirecta de la fracción condensada. Había que tener en cuenta todos estos efectos para corregir la aproximación de impulso y comparar los cálculos con los resultados experimentales.

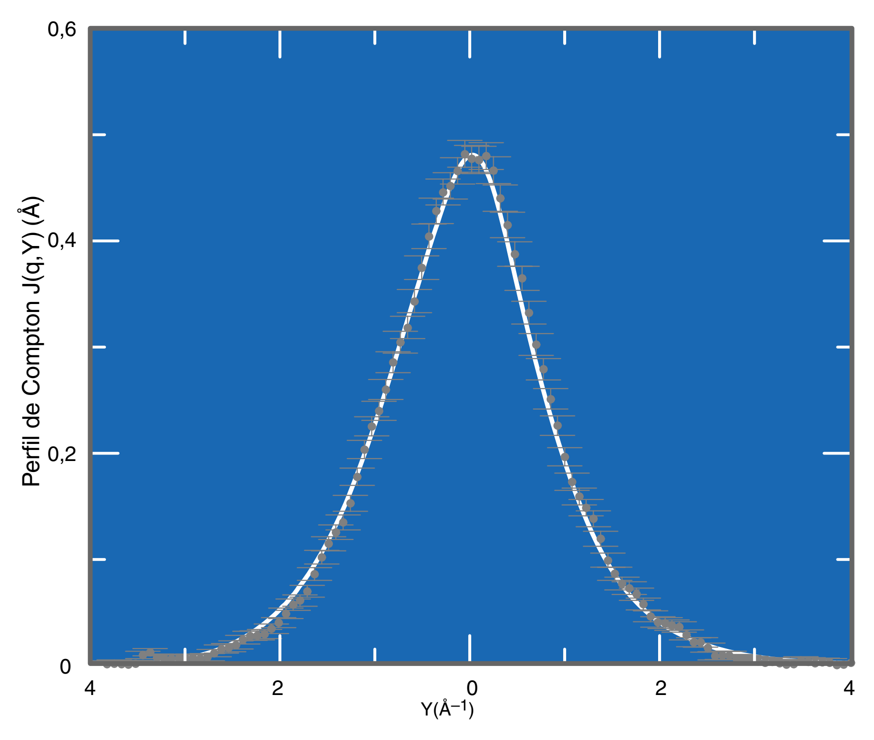
Los estudios teóricos recientes y los esfuerzos experimentales por aumentar el momento transferido indican que, en realidad, las condiciones de validez de la aproximación de impulso, que permite despreciar las interacciones de estado final, sólo se alcanzan asintóticamente. Aunque el momento transferido sea muy alto, siempre deben considerarse las correcciones oportunas.

Cuando se tienen en cuenta todas estas consideraciones, se logra un buen acuerdo entre los cálculos teóricos y los resultados experimentales para la función de dispersión. Simbolizada por $J(q,Y)$, esta función es proporcional a la función de estructura dinámica. En la aproximación de impulso, la función depende sólo de Y, combinación de la energía y momento transferidos, y no de cada uno de ellos por separado, obteniéndose así una propiedad de escalado (*scaling*). Con frecuencia, se comprueba si los datos experimentales a diversos momentos escalan, para confirmar que se ha alcanzado el régimen de la aproximación de impulso. En última instancia, y en el caso concreto del ^{4}He, el acuerdo teoría-experimento es excelente y este es el único tipo de prueba que podemos obtener de la existencia de la fracción condensada por medio de la dispersión de neutrones.

En un principio esta comparación entre teoría y experimentación es la única posible. Si se utilizan las correcciones de estado final para extraer de los resultados experimentales la distribución de momentos, siguiendo un tipo de proceso inverso, las barras de error experimentales producen una incertidumbre enorme; los resultados podrían ser compatibles incluso con una ausencia de fracción condensada. Por otro lado, las dificultades presentan un lado positivo. Estimulan la actividad teórica y experimental, que colateralmente ha contribuido al desarrollo de avanzados algoritmos de análisis de datos.



7. ESQUEMA del perfil de Compton de un líquido bosónico correlacionado como el ^{4}He. La flecha de trazo grueso indica la esperada señal del condensado de Bose-Einstein.



8. PERFIL DE COMPTON de ^{4}He líquido. Los puntos corresponden a las medidas de dispersión inelástica experimentales y la línea a la predicción teórica.

Tal y como sucedía con el gas libre de bosones, muchos de estos efectos dependen de la dimensionalidad del sistema. La investigación experimental explora nuevas situaciones. Se han logrado ya sistemas cuasibidomensionales y monodimensionales. Se ha comprobado que las películas de ^{4}He absorbidas en substratos de grafito se comportan como si el grado de libertad perpendicular a la superficie estuviera completamente congelado y, por tanto, el sistema fuera bidimensional. De forma similar, si introducimos ^{4}He líquido en nanotubos de carbono obtenemos un sistema que se comporta como si fuera monodimensional. Los cálculos teóricos a temperatura cero muestran que $n_0 = 23\,\%$ en el caso bidimensional y $n_0 = 0$ en el caso monodimensional. Igual que en el gas libre, la fracción condensada en sistemas bi- y monodimensionales es nula a temperatura distinta de cero.

Así pues, la fracción condensada debe hacer frente a dos enemigos importantes, la temperatura y las correlaciones. Si nos ceñimos al helio, basta una temperatura inferior a ≈ 2 kelvin para tener fracción condensada; la densidad es grande, pero los efectos de las correlaciones, drásticos, reducen de forma sustancial el valor de la fracción condensada a temperatura nula. En los experimentos con átomos alcalinos los sistemas son muy diluidos y las correlaciones, poco importantes; por eso se necesita una temperatura mucho menor para conseguir poner de manifiesto el comportamiento ondulatorio.

La condensación de Bose-Einstein ha pasado de ser un tema restringido, limitado al gas libre de bosones y a su búsqueda en ^{4}He líquido, para convertirse en asunto multidisciplinario. Gases alcalinos y ^{4}He líquido aparte, se consideran también fenómenos de condensación de bosones en ámbitos muy dispares de la física, con escalas de energía y longitud muy diferentes.

Hemos visto que los condensados de Bose-Einstein pueden producirse en conjuntos de átomos con comportamiento bosónico. Sin embargo, nada impide crear un sistema de fermiones inestable frente a la formación de pares de fermiones. Desde una óptica energética, al sistema le puede resultar más ventajoso tener apareados sus constituyentes, dando lugar a pares de fermiones que desarrollan un comportamiento bosónico. Un ejemplo típico son los pares de Cooper formados por electrones, que dan origen a la superconductividad de los metales. De forma parecida ocurre con el apareamiento de átomos de ^{3}He por debajo de 2,6 milikelvin, razón de la superfluidez del ^{3}He líquido. Y en otro marco completamente distinto, el de las estrellas de neutrones, se buscan pruebas de la posible existencia de condensados de kaones o piones (ambos bosones).

Muy recientemente, la posibilidad de estudiar los efectos de la estadística en sistemas muy diluidos se ha extendido al caso fermiónico. En el laboratorio de Boulder, donde se consiguieron los primeros condensados bosónicos con átomos de rubidio, se ha logrado confinar, a temperaturas de 100 nanokelvin, átomos de potasio que se comportan como fermiones.

Estos experimentos abren nuevas posibilidades para profundizar en el comportamiento fermiónico. Quizás, a temperaturas inferiores, la interacción residual podría convertir al sistema en inestable frente a la formación de pares de átomos, que se comportarían bosónicamente y que podrían dar lugar a un gas atómico fermiónico superfluido. Y hay quien, presa de la excitación, imagina una nueva era de relojes y láseres atómicos.

En su largo camino, el estudio de la condensación de Bose-Einstein nos ha traído notables avances técnicos y aportaciones a la teoría de la materia. El descubrimiento de la CBE en gases diluidos de átomos alcalinos, así como el reconocimiento del fenómeno en distintos campos de la física, han dotado a la condensación de Bose-Einstein de entidad propia, un campo fecundo de investigación donde germinan e inciden ideas y técnicas avanzadas cuyos frutos seguirán cosechándose en un futuro próximo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EXCITATIONS IN LIQUID AND SOLID HELIUM. Henry R. Glyde, Clarendon Press, Oxford, 1994.

FINAL-STATE EFFECTS ON SUPERFLUID ^{4}HE IN THE DEEP INELASTIC REGIME. F. Mazzanti, J. Boronat y A. Polls en *Physical Review*, B 53, n.º 5661, 1996.

EL CONDENSADO DE BOSE-EINSTEIN. Eric Cornell y Carl E. Wieman, en *Investigación y Ciencia*, n.º 260, págs. 6-12, Mayo de 1998.

ONSET OF FERMI DEGENERACY IN A TRAPPED ATOMIC GAS. B. DeMarco y D. Jin en *Science*, vol. 285, n.º 1703, 1999.

http://amo.phy.gasou.edu:80/bec.html; http://jilawww.colorado.edu/bec

Crecimiento racional



Si Roma no se levantó en un día, a Atlanta le ha faltado muy poco. Esta metrópoli ha sido en los años noventa el máximo exponente de explosión urbana, lo mismo en crecimiento demográfico que en puestos de trabajo, construcción de viviendas y trazado de autopistas. La ciudad arrasada por el fuego en la guerra de Secesión pasa por ser el asentamiento urbano de más rápida expansión en la historia.

Pero hoy Atlanta sufre otro asedio, amenazada esta vez por un crecimiento incontrolado. La urbe se extiende sobre una superficie mayor que muchas provincias españolas, y el tiempo medio de acceso al trabajo a través de vías de la máxima congestión es el más alto del país. Su cielo plomizo de contaminación produjo 69 días de "alerta de ozono" en 1999, y 45 días en los ocho primeros meses de 2000. Hace dos años que un juez federal suspendió la construcción de una autopista hasta que los organismos locales no presentaran un plan adecuado para mejorar la calidad ambiental. Hewlett-Packard y otras empresas, preocupadas por la calidad de vida, han empezado a buscar nuevos lugares para sus instalaciones. Ante tales reveses, ¿puede Atlanta acometer otra rehabilitación espectacular?

A escala menos descomunal, en otras partes se libra la misma lucha contra los problemas del crecimiento. En los últimos años, se han multiplicado las iniciativas en favor de la conservación del suelo, mejoras de aparcamiento, rehabilitación de los barrios, transporte público y otras medidas para afrontar la expansión incontrolada. Por doquier preocupan el crecimiento anárquico y el tráfico. Estas cuestiones, avivadas por la prensa, dan mucho pábulo al análisis político, reflejado en campañas locales y nacionales para fomentar un crecimiento más racional.

El enfoque político, sin embargo, puede apartarnos de un hecho real: esta preocupación general por el crecimiento urbano ha desencadenado un torrente de innovaciones. Incentivos económicos creativos, nuevas técnicas de construcción, nuevos planes urbanísticos, estrategias de mercadotecnia y técnicas de predicción demográfica, así como la necesidad de informar al público sobre las estimaciones científicas de los costes de la expansión urbana. Se han establecido nuevos centros de investigación en prestigiosas universidades, que se suman a los ya acreditados, dedicados al estudio del desarrollo del suelo. Aunque este fenómeno se viene tratando desde

DONALD T. CHEN es director de Smart Growth America, un consorcio de 50 grupos radicado en Washington, D.C. que defiende la construcción de viviendas asequible, las reinversiones urbanas, la conservación de espacios abiertos y unos transportes más fiables.

de las ciudades

¿Puede evitarse la expansión urbana desordenada? El único modo de encontrar respuesta es salir y ver lo que sucede en el mundo real

Donald D. T. Chen



los años cincuenta, se abre ahora una oportunidad única para evaluar medidas que lo contrarresten, nunca ensayadas anteriormente.

1. ¿COCHES O PERSONAS? La urbanización del suelo orientada al automóvil (*página opuesta*), dominante en los cincuenta, está perdiendo aceptación. Los compradores de viviendas piden cada vez más barrios donde se pueda pasear, a menudo construidos sobre espacios urbanos rehabilitados como Park DuValle (*arriba*).

No es esto, no es esto

¿Por qué la expansión urbana se ha convertido en un tema candente? Al fin y al cabo, el problema no es nuevo. A menudo tachado de insípido y aburrido, el fenómeno ha sido una base firme para la construcción de viviendas de clase media desde la Segunda Guerra Mundial, y para muchos materializa el sueño americano. ¿Dónde está, pues, la novedad?

Se podría hallar respuesta en el propio significado de "expansión urbana". En los años cincuenta y sesenta, el concepto iba asociado a "los enclaves periféricos", condenados a una homogeneidad cultural y arquitectónica. Pero era una crítica epidérmica. Millones de estadounidenses construían sus casas en tales aledaños.

Comparación de dos modelos

Matriz de criterios para crecimiento racional	Puntos disponibles	Plaza del Triángulo	Almacén “Robles Perdidos”
Situación del proyecto (elegir una)			
Centro de la ciudad	45		
Casco urbano	28	28	28
Zona de urbanización deseada	12		
Utilización mixta			
Con viviendas por encima del primer piso	20	20	0
Utilización peatonal a nivel de calle	15	15	15
Con dos utilizaciones	15	15	0
Con tres utilizaciones	25	25	0
Aspecto de las calles			
Arboles en la calle	9	9	0
Protección climática (toldos, soportales, etc.)	3	3	0
Aceras de 3 metros de anchura como mínimo	9	9	0
Disposición de pasos en los cruces de calles	12	12	0
Zonas verdes accesibles			
Mayores de 46 metros cuadrados	4	4	0
Con asientos	2	2	0
Con jardines, incluso árboles	2	2	0
Con ornamentación pública exterior	4	0	0
Situación de los edificios			
Orientados a la red peatonal	3	3	0
Construidos con derecho de paso	12	12	0
Aparcamiento detrás del edificio	6	6	0
Total de puntos para los criterios de crecimiento racional, incluidos los que aquí no se muestran		402	169

FUENTE: Austin PECSD



Plaza del Triángulo
90.000 metros cuadrados de superficie:
5300 metros cuadrados de oficinas
14.400 metros cuadrados de tiendas
794 unidades residenciales
26.500 metros cuadrados de zona verde
Edificios de tres a cinco pisos

Los argumentos de hoy contra la expansión son radicalmente diferentes en el fondo y en la forma. La urbe se desparrama siguiendo un proceso que ha escapado al control de los ciudadanos. En otras palabras, el crecimiento urbano ya no se asimila a un cierto tipo de desarrollo disperso en el que se habilitan zonas extensas para residencias, comercios y oficinas. Antes bien, se considera como una extensión de ese desarrollo, al parecer irrefrenable, que agudiza la congestión, hace subir los impuestos, suprime inversiones en núcleos asentados y devora espacios abiertos. A esta percepción contribuye parcialmente el propio ritmo de urbanización del suelo, aproximadamente el doble que hace diez años según el Departamento de Agricultura de EE.UU. Descontentas por este anárquico crecimiento, las unidades vecinales se rebelan contra la idea común de que el crecimiento continuo es deseable, inmutable e inevitable. Los residentes en ciudades, aledaños y áreas rurales se han coaligado en agrupaciones que antaño parecían improbables.

En los debates locales, la cuestión que más aflora es la preocupación por el entorno. Aunque sólo un 5 por ciento de la superficie total de la nación está edificada, las zonas seleccionadas para desarrollo comprenden una excesiva proporción de reservas naturales, humedales y cursos fluviales. Las dos regiones de mayor riqueza biológica de Estados Unidos, Florida y el sur de California, figuran también entre las de crecimiento más rápido. Según fuentes oficiales, Florida ha perdido la mitad de sus humedales, y más del 90 por ciento del ecosistema costero de California ha sucumbido al desarrollo.

Aunque la conservación de determinadas especies acapare la atención en estas batallas por el entorno, los ecologistas se preocupan cada vez más por la degradación general del ecosistema. Ha brotado en los últimos años una nueva rama de la ecología que estudia el negativo influjo de las zonas urbanizadas sobre el interior menos desarrollado.

Scenic America han promovido campañas para salvaguardar los paisajes pintorescos. Contra el crecimiento anárquico se oponen con tenaz vigor las sociedades históricas dedicadas a proteger los campos de batalla de la Guerra Civil. En cinco estados los grupos conservacionistas y de astrónomos aficionados han conseguido que la legislación ampare un cielo nocturno estrellado, ahora empañado por la “contaminación lumínica” de un creciente número de asentamientos.

La economía es otro factor preocupante. Numerosos análisis de la repercusión fiscal revelan que el crecimiento de baja densidad y discontinuo tiende a generar costes más elevados para los servicios municipales y la infraestructura que otras formas de desarrollo más compactas. Burchell y Listokin, de Rutgers, han determinado que los aumentos de densidad moderados podrían reducir del 25 al 60 por ciento los costes de capital para carreteras y del 15 al 40 por ciento para conducciones de agua y alcantarillado.



Almacén "Robles Perdidos"
93.600 metros cuadrados de superficie:
16.700 metros cuadrados de tiendas
800 metros cuadrados de bancos
700 metros cuadrados de restaurante
No hay zona verde
Edificios de una altura

2. HASTA LOS GRANDES ALMACENES se transforman. Austin, como muchas otras ciudades, ha mejorado sus infraestructuras para fomentar el desarrollo. Pero ahora dedica parte de sus inversiones a proyectos del "Nuevo Urbanismo", que incluyen acceso peatonal, utilización mixta y otras comodidades (*tabla en página opuesta*). La urbanización de la Plaza del Triángulo recibió incentivos por valor de 1400 millones de pesetas.

La construcción de escuelas también se convierte en un enorme problema por los vaivenes y las mezclas desordenadas de población. Entre 1970 y 1995, la matriculación en escuelas públicas de Maine descendió en 27.000, y sin embargo el gobierno del estado invirtió en un período similar unos 65.000 millones de pesetas en la construcción de nuevas aulas y unidades. En la mayoría de las zonas lo que se recauda por impuestos sobre la propiedad no alcanza a cubrir estos costes suplementarios, creando una presión por elevar los impuestos.

El otro asunto que ha llegado a dominar la política de crecimiento es el tráfico. Según el Instituto de Transporte de Texas, los retrasos per cápita debidos al tráfico en las mayores áreas urbanas aumentaron en el 20 por ciento desde 1993 a 1997. El tiempo y el combustible derrochados por tal causa suponen un gasto anual de 14 billones de pesetas. Para una familia media, estos costes se manifiestan en una firme dependencia del automóvil: traer y llevar los chicos a la escuela o a los entrenamientos deportivos; conducir entre manadas de vehículos utilitarios para comprar dos litros de leche; levantarse cada día más temprano para vencer la congestión de tráfico.

La falta de alternativas a conducir el coche también tiene consecuencias directas sobre la salud. En el *Journal of the American Medical Association* del año pasado, Koplan y Dietz, de los Centros de Control y Prevención de Enfermedades, sostenían que la falta de posibilidades de caminar y circular con seguridad en bicicleta por las zonas de crecimiento urbano contribuye a estilos de vida sedentarios y a una "epidemia" de obesidad, tanto en adultos como en niños. El primer objetivo para aumentar la actividad física en esas comunidades sería sustituir los paseos en coche por recorridos a pie o en bicicleta.

¿Qué se puede hacer?

El clamor público contra la expansión desordenada ha conducido a buscar alternativas, resumidas en la expresión "crecimiento racional". Aunque por éste suele entenderse el poner límites al crecimiento urbano, abarca en realidad una serie de medidas dirigidas a fomentar un desarrollo que ofrezca opciones de transporte, conserve los espacios abiertos y revitalice el casco antiguo. Si bien muchos de estos intentos —tales como las reinversiones urbanas y los proyectos de los "nuevos urbanistas"— hayan sido bien acogidos, han tenido que vencer las arraigadas prácticas que favorecen la expansión desordenada.

Las teorías que explican los motivos de tal expansión, numerosas y políticamente discutibles, caen dentro de seis categorías posibles. Ninguna de estas explicaciones sería por sí sola suficiente, pero su combinación hace que los promotores urbanos elijan el crecimiento informe como el camino más cómodo. En los cincuenta últimos años, se han normalizado el diseño, la construcción, financiación, reglamentación y mercadotecnia del desarrollo del suelo. Por todo el país las agencias de planificación imponen multitud de requisitos sobre las nuevas urbanizaciones: las calles tendrán anchura suficiente para circular a 100 kilómetros por hora, entre edificios y calzada habrá una gran separación, los espacios de aparcamiento serán de determinado tamaño, y así sucesivamente. Los resultados están a la vista: edificios alineados en calles muy amplias, rodeados por un mar de asfalto al que sólo puede accederse en coche.

Algunos de los antiguos núcleos urbanos más atractivos de EE.UU., como Annapolis en Maryland o North Beach en San Francisco, nunca podrían haberse edificado según esas normas. Los promotores que intentan deshacer este modelo deben emprender una costosa carrera de obstáculos para conseguir permisos, modificaciones y otras sutilezas administrativas. Los bancos se niegan a cooperar ante la falta de casos comparables —un historial de los proyectos que hayan logrado éxito—, y por eso es frecuente que los promotores deban aportar sus propios fondos para financiar los recursos. De ahí ha resultado una gama de opciones muy limitada en cuanto al estilo y la ubicación de las nuevas viviendas: el modelo típico de casas unifamiliares en distritos concebidos para el automóvil, sobre terrenos que antes fueron bosques o campos de labor.

Cuestión de imaginación

Se están introduciendo otras formas de crecimiento que salvan estos obstáculos. A gran escala, los gobiernos del estado y el municipio han empezado a ejecutar planes de crecimiento racional que conservan los espacios abiertos y remodelan las zonas urbanas. Nueva Jersey ha reservado unas 33.000 hectáreas de terrenos de cultivo y espacios abiertos, con el objetivo final de llegar a las 40.000 hectáreas. Este es un ejemplo de la tendencia nacional hacia la compra de derechos de desarrollo —lo que suele llamarse servidumbre de conservación— para retribuir a los agricultores por no convertir sus tierras. Los propietarios quedan en libertad de seguir explotando sus terrenos, e incluso de ven-

¿Por qué se desparraman las ciudades?

Afluencia

Los períodos de rápida urbanización del suelo coinciden con épocas de prosperidad.
El crecimiento incontrolado es un signo inevitable de buenos tiempos.
Objeción: Los promotores y compradores de viviendas no asumen el coste total de la expansión; el coste de la infraestructura y los servicios recae sobre los contribuyentes.

Subvenciones del gobierno

La expansión urbana está fomentada por ayudas del gobierno, como son los descuentos federales sobre hipotecas, la construcción de autopistas y las subvenciones para servicios de agua, alcantarillado y electricidad.
Objeción: Al correr de los años, las subvenciones públicas se han reducido, pero el fenómeno de la expansión no ha perdido fuerza.

Exodo de los blancos

Allá por los años cuarenta, afluían a las ciudades gran cantidad de negros e inmigrantes, con un desplazamiento masivo de los blancos hacia los suburbios. De ahí ha resultado una segregación física por raza y clase social a través de la discriminación en las hipotecas y una zonificación excluyente.
Objeción: Hoy la raza es un factor menos importante que los aspectos de calidad de vida como el tráfico y las escuelas.

Crecimiento de la población

Las tasas de nacimiento e inmigración disparan el crecimiento urbano.
Objeción: La expansión también se ha producido en todas las áreas metropolitanas en que la población no ha crecido e incluso ha menguado. Un Informe de la Administración Federal de Autopistas calcula que el crecimiento demográfico sólo justifica un 13 por ciento del incremento de circulación de vehículos en los últimos años.

Cambios técnicos

La expansión urbana es una consecuencia de la popularización del automóvil, la construcción de carreteras de mejor calidad y las innovaciones en construcción de casas adosadas.
Objeción: Otros países, incluso con holgura de suelo, han pasado por idénticos cambios sin repercutir en un crecimiento tan masivo.

Falta de previsión del gobierno

La expansión desordenada es un producto de la incapacidad del gobierno para planificar el crecimiento o respetar los planes existentes.
Objeción: La ejecución deficiente no es tanto la causa como el efecto. Si hubiera habido voluntad real, los gobiernos habrían encontrado la manera de cumplirlo.

derlos por parcelas, a condición de que la tierra nunca se urbanice.

Además, Nueva Jersey ha fomentado la renovación de los edificios antiguos por medio de un nuevo plan urbanístico adoptado en 1997. Al cabo de un año, las inversiones en rehabilitación habían aumentado el 83 por ciento en Jersey City, el 60 por ciento en Newark y el 40 por ciento en Trenton. Maryland aprobó una medida similar en abril de 2000. En otras regiones se anulan viejas ordenanzas urbanas y arquitectónicas para favorecer la construcción de nuevas zonas residenciales de utilización mixta que sean cómodas para los peatones.

Para muchos ayuntamientos, es un gigantesco empeño desmantelar el laberinto de convenios sobre división de zonas, planificación y financiación. Optan por redirigir las subvenciones destinadas a expansión urbana hacia otras formas de crecimiento más deseables. En la texana Austin, por ejemplo, se quería corregir los problemas de tráfico y descentralización que empezaban a asolar la región, pero las facultades del gobierno municipal en cuanto a planificación y zonificación resultaban un tanto escasas. Por eso la ciudad estableció un sistema de incentivos, la "matriz de criterios para crecimiento racional", que permite evaluar los nuevos proyectos mediante la asignación de puntos a una serie de características como proximidad a medios de transporte, accesos para peatones, existencia de infraestructuras actuales, proporción en que se combinan los distintos usos, nueva urbanización de solares industriales abandonados y varias otras.

Los proyectos que acumulan suficientes puntos por el baremo anterior gozan de numerosas ventajas: concesión rápida de permisos, exención de tasas de urbanización, aportación de nuevas infraestructuras y compra de las áreas dedicadas a parques y calles dentro del proyecto. Para asegurar que las subvenciones sean merecidas, el municipio ha fijado un techo de los incentivos basado en los ingresos esperados en un período de cinco a diez años por impuestos sobre la propiedad. Aunque tales incentivos se reduzcan a un 1 por ciento del coste total del proyecto, han bastado para mejorar la calidad de los proyectos.

Del municipio al estado. También a esta escala administrativa empieza a arraigar el sistema de subvenciones mencionado. En 1997 Maryland aprobó una iniciativa de crecimiento racional y conservación de los barrios, que entre otras cosas establece "zonas de financiación prioritaria" —barrios viejos, distritos deprimidos y ciudades pequeñas— con derecho a recibir asistencia del estado para infraestructuras y otras mejoras colectivas. En Utah y por iniciativa popular se ha desarrollado un plan de "crecimiento de calidad", que promueve grandes inversiones en el transporte público.

Muchos de estos proyectos han importado ideas de Europa. El Fondo German Marshall de los Estados Unidos sostiene un programa de intercambio para enviar funcionarios estadounidenses a lugares de Europa con experiencia en crecimiento racional. Así, las delegaciones han visitado el moderno sistema de tranvías de Estrasburgo, los proyectos de tipo "compacto, urbano, verde" de Munich, y el Finger Plan (Plan Dedos) de Copenhague, que urbaniza a lo largo de pasillos de transporte público.

En busca de nuevos mercados

¿Cómo puede un promotor asegurarse de que unos proyectos innovadores van a dar beneficios? Lo típico es evaluar las ventas futuras por toscos métodos centrados en la oferta y la demanda global de casas, tratando las viviendas como mercancías genéricas, iguales unas a otras como los jamones de cerdos, en vez de productos de consumo como los coches o las ropas que varían según las preferencias individuales. El método normal determina cuántas casas necesita la gente, pero no qué clase. Su eficacia disminuye cuando se analiza el mercado de nuevas viviendas en zonas urbanas, edificios urbanos en "ciudades jardín" (barrios donde se pueda pasear), y casas unifamiliares con porches y avenidas contiguas.

Pero ciertas compañías aplican hoy medidas de predicción ordinarias combinadas con análisis demográficos y técnicas de mercadotecnia propias de las ventas al por menor. Una de las primeras es Zimmerman/Volk

Associates (ZVA), analista de mercados residenciales que proyecta el relleno de espacios urbanos y desarrollos de Nuevo Urbanismo. A partir de datos tomados de la oficina del Censo, del Servicio Fiscal interior y de encuestas familiares —todos ellos ajustados a las proporciones de barrio— ZVA deduce las preferencias de vivienda de los diferentes grupos demográficos.

La compañía aplicó sus métodos a un ambicioso proyecto de viviendas asequibles en Louisville, denominado Park DuValle. A lo largo de decenios, Park DuValle ha sido ejemplo de la peor clase de urbanismo subvencionado: edificios del tipo de barracones en una parte de la ciudad descuidada y aislada. Con ayuda de fondos federales, el municipio emprendió la reurbanización de la zona. Pero los arquitectos, de Urban Design Associates, en vez de construir las tradicionales casas de estilo rancho, diseñaron un lugar que se asemejara al viejo Louisville, con sus parques y su genuina arquitectura victoriana. La previsión de ZVA señalaba un mínimo de 39 ventas, cifra muy optimista para las autoridades locales. Y Park DuValle alcanzó ese objetivo en menos de tres meses.

El citado proyecto es parte de un plan federal más amplio, el programa HOPE VI, que pretende terminar con la práctica de alojar familias en construcciones masivas, en favor de armonizar módulos de viviendas asequibles, a precios de mercado, en barrios atractivos. Otro ejemplo lo encontramos en Ellen Wilson Homes, al sudeste de Washington, D.C. Afrontando múltiples presiones debidas a restricciones de coste, planes modernos, directrices federales y requisitos de conservación histórica, se introdujeron aquí varias innovaciones a la construcción en hilera y los aburridos adornos victorianos, a saber: ladrillos que al girar presentan diferentes texturas; sencillos diagramas relacionados por números, fáciles de seguir por los constructores; construcción panelada con madera previamente cortada, y edificación en cinco alturas solamente. Combinando de muchas maneras estas características se consiguió construir a bajo coste un caleidoscopio de fachadas.

Los retos planteados inicialmente a Park DuValle y Ellen Wilson Homes no son privativos del interior de ciudades. En el corazón de Silicon Valley, en el llamado Mountain View, surgió el problema de disponer de una superficie comercial abandonada. Lo normal hubiera sido que un constructor la renovara, pero el municipio decidió arriesgarse, echar abajo el almacén y reemplazarlo por un barrio residencial. Peter Calthorpe, arquitecto del movimiento Nuevos Urbanistas, rediseñó el lugar; en él se mezclan tiendas, oficinas y viviendas, con una densidad bastante alta (30 a 37 viviendas unifamiliares por hectárea, comparadas con 7 a 10 por hectárea en las urbanizaciones típicas de la zona). Para que el diseño compacto sea más atractivo, el equipo de Calthorpe aplicó una serie de técnicas para conseguir el máximo de iluminación natural y una sensación de amplitud dentro de cada vivienda. Una de ellas es la generosa utilización de tubos flexibles de Mylar que conducen la luz natural a las habitaciones más bajas.

Panorámica urbana

Los casos anteriores son ejemplos de “relleno” bien logrado: nuevo desarrollo de fincas degradadas o construcción sobre solares vacíos en barrios ya terminados. A medida que las ciudades se recuperan, estos proyectos son cada vez más comunes, atrayendo la in-



Cruce adecuado para personas

Cruce concebido para vehículos

3. LAS CALLES ANCHAS con esquinas redondeadas animan a conducir deprisa. En los barrios tradicionales y de “nuevo urbanismo”, las calles son más estrechas y las esquinas en ángulo recto, lo que obliga a conducir más despacio y protege a los peatones.

4. LOS GARAJES dominan la fachada principal de una vivienda suburbana tradicional. En los barrios de “nuevo urbanismo” los garajes se colocan al costado o detrás, lo que despeja la entrada y hace más atractiva la casa.

Garaje a la vista

Garaje oculto



Una nueva teoría del urbanismo

El movimiento "Nuevo Urbanismo" debe buena parte de su fama al rediseño de la periferia con la creación de pequeñas ciudades. Pero se basa en principios igualmente importantes para la planificación urbana, rural y regional

Andrés Duany

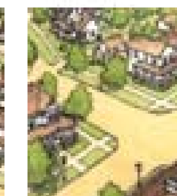
El término "crecimiento" tuvo tiempo atrás connotaciones positivas: mejor educación, mejor calidad de vida. Pero si se pronuncia ahora, lo más probable será escuchar maldiciones sobre la congestión del tráfico, subida de impuestos, aglomeración escolar y la pavimentación del campo.

La razón está en el cambio de modelo urbano. Antes de la Segunda Guerra Mundial, cuando una campiña verde se perdía, se ganaba un caserío, una aldea o un pueblo. Era un intercambio equitativo. Pero hoy, al edificar sobre un espacio abierto, aparece un distrito residencial, un centro comercial o un aparcamiento de empresas. Para la mayoría esta transacción no es ventajosa. Los promotores de anteguerra eran generalistas —construían pueblos enteros o barrios urbanos—, mientras que los de hoy son especialistas. Uno construye centros comerciales, otro aparcamientos de oficinas, otro edifica viviendas. Los ingenieros de tráfico diseñan solamente carreteras; los analistas del ambiente sólo se preocupan de los espacios abiertos. Todo un entramado de códigos de zona describe minuciosamente los detalles de este proceso, pero nadie contempla el cuadro completo. De ahí resulta un conjunto de culturas individuales: elementos comunitarios disgregados en áreas especializadas.

Una por una, las decisiones tomadas por estos especialistas son admisibles, pero colectivamente conducen a un desequilibrio funcional. Por ejemplo, las calles anchas en zonas residenciales parecen idóneas para la circulación rápida de vehículos de emergencia. Sin embargo, son más peligrosas para los peatones, en particular los niños, y suelen ofrecer menos vías de interconexión, lo cual dificulta el acceso de los coches de bomberos a lugares críticos. No debe adoptarse aisladamente ninguna decisión de diseño, ya sea la anchura de las calles, la densidad de viviendas, la ubicación de edificios o la disposición del paisaje. Esta es la perspectiva fundamental del nuevo urbanismo: prestar suma atención a la coherencia del diseño urbano.

Algunos han criticado el nuevo urbanismo por ser demasiado suburbano; no quieren habitar en una versión moderna de la pequeña ciudad norteamericana tradicional. Tal vez prefieran el bullicio de la ciudad o la tranquilidad de la campiña. Pero el nuevo urbanismo es hoy lo suficientemente general como para cubrir una





gran diversidad de instalaciones humanas. Su filosofía de diseño es válida para el campo entero de desarrollo, desde los territorios vírgenes hasta las ciudades superpobladas. El transecto, así se denomina el sistema, sirve hoy de guía a numerosas ciudades nuevas.

El transecto, concepto robado a la ecología, consiste en una sección transversal geográfica que atraviesa una secuencia de entornos: por ejemplo, desde tierras pantanosas a altiplanicies, o de tundras a colinas. Este corte transversal extiende los entornos naturales hasta el habitáculo humano según va aumentando la densidad y la inmersión urbana. Existe un gra-

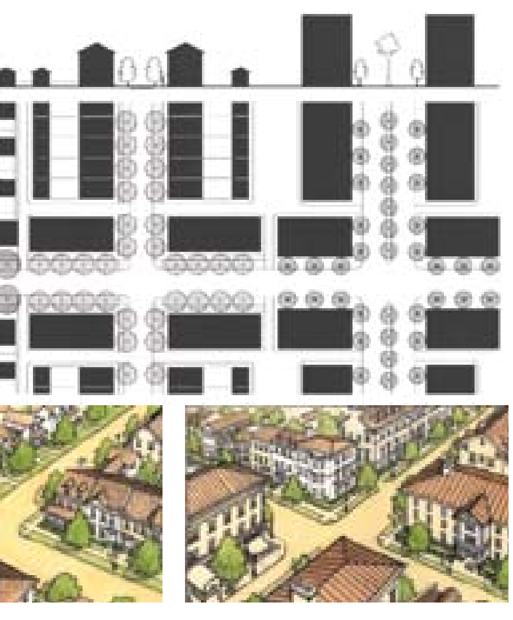
dustria de la propiedad inmobiliaria a terrenos antaño evitados. Detroit, por ejemplo, ha pasado treinta años sin solicitar un solo permiso de nueva edificación. En 1987, doce promotores locales tomaron la insólita decisión de construir dos casas cada uno en un conflictivo barrio de la ciudad, utilizando así Homearama, una técnica común para venta de viviendas en los nuevos distritos suburbanos. Las viviendas de la urbanización (rebautizada "Victoria Park") se vendieron a un buen ritmo, dejando atrás a sus equivalentes en las áreas suburbanas, lo que indica en primer término que existe una demanda firme de alojamientos urbanos. Desde entonces, algunos de los barrios urbanos más asolados por el crimen han llegado a figurar entre las propiedades más codiciadas de la región.

A veces, no obstante, las ciudades son víctimas de su propio éxito. Antaño se fomentaba la reinversión en áreas urbanas, suponiendo que ello beneficiaría a las familias de baja renta. Pero ahora que la vida en la ciudad vuelve a estar de moda, la gente pobre se ve desplazada por el aflujo de las clases acomodadas. Según el Departamento de Viviendas y Desarrollo Urbano, en los tres años últimos los precios de fincas urbanas han crecido dos veces más deprisa que la inflación, y un 50 por ciento más los alquileres. Pese al atractivo de Park DuValle y Ellen Wilson Homes, tales proyectos ofrecen menos viviendas subvencionadas que los bloques residenciales que sustituyen.

Para compensar esta tendencia, existen diversos programas destinados a dar acceso a la propiedad de su vivienda a un mayor número de familias de rentas medias y bajas. Uno de los más eficaces es el LEM (*Location-Efficient Mortgage*, hipoteca en localización útil), que recompensa a los compradores de viviendas el haber elegido barrios densos, atendidos por transporte público. Las familias que viven en tales zonas pueden a menudo pasar sin segundo coche, o sin coche alguno. Dado que un coche medio supone un gasto de 1.200.000 pesetas al año en mantenimiento, amortización, seguro y combustible, el ahorro es notable. El LEM permite que los compradores apliquen esos ahorros a financiar hipotecas que superan en 3 a 9 millones de pesetas las que normalmente les correspondería percibir. En Chicago, Seattle y California existen ya bancos que ofrecen este servicio, y Fannie Mae (organización legal que convierte las hipotecas en valores de inversión) se ha comprometido a comprar unos 19.000 millones de pesetas en tales hipotecas durante un período de prueba.

¿Tendencia o esnobismo?

Resulta todavía demasiado pronto para decir si el crecimiento racional representa una tendencia o se trata de una moda pasajera. Pero su formulación es tan popular, que un confuso entramado de proyectos y políticas la están adoptando. Algunas de ellas, como la de cons-



UN CORTE TRANSVERSAL ideal muestra, en alzada (*fila superior*) y en planta (*fila inferior*), la disposición geográfica de la transición del campo a la ciudad. A cada incremento de densidad se aplica un conjunto de principios de diseño.

Menos densidad	Más densidad
Principalmente residencial	Principalmente comercial
Edificios más pequeños	Edificios más grandes
Mayoría de edificios aislados	Mayoría de edificios adosados
Casas muy remetidas	Casas poco remetidas
Carreteras y carriles	Calles y avenidas
Caminos y veredas	Aceras y pasadizos
Césped blando	Bordillos alzados
Grupos mixtos de árboles	Arboles de una sola especie

diente desde la mansión en el bosque hasta los grandes núcleos suburbanos con praderas comunes, atendidos por una red de carreteras de reserva, y hasta los sectores urbanizados de complejidad y continuidad aún mayores. Las aldeas y los pueblos se componen, en grados diversos, de estos entornos. Las ciudades extienden esta gama hasta un núcleo urbano formado por edificios poco o nada característicos. Todas estas secciones satisfacen el conjunto de necesidades y deseos humanos. Observando las comunidades en plena actividad, identificamos principios de diseño comunes para cada sección de este corte transversal. Al pasar de una a otra sección, incluso del medio natural al de origen humano, las características contempladas se solapan y la transición se realiza gradualmente.

El corte transversal no suprime las normas incorporadas en los planes zonales actuales. Simplemente las asigna a las secciones del corte a las que pertenecen. De este modo, los requisitos sobre anchura de calles no son buenos ni malos, sino correcta o incorrectamente asignados. Puede convenir que las calles sean anchas cuando esté justificada la circulación rápida, aunque sea a expensas del entorno peatonal. Análogamente, las normas para sistemas de saneamiento no son incorrectas, lo que pasa es que sólo valen para zonas urbanas con aceras y bordillos. En las zonas rurales el agua de lluvia puede infiltrarse a través de terrenos verdes y húmedos. De hecho, mediante el corte transversal se ofrece una gama de opciones más amplia. En los planes habituales, por ejemplo, se ha de dejar delante de la casa un determinado espacio de hierba o aparcamiento pavimentado, pero el sistema de corte transversal ofrece al menos seis opciones más.

No todos los entornos posibles encajan en el transecto. Los edificios públicos, religiosos, educativos, oficiales o culturales reclaman un tratamiento especial. Los aeropuertos, estaciones de autobuses y camiones, minas y fábricas se acomodan mejor en sus propias zonas. Pero el corte transversal suprime otras formas, injustificadas, de zonificación de un solo uso, en la que cualquier tentativa de unir los escenarios de la vida cotidiana —viviendas, tiendas y lugares de trabajo— se considera una aberración que ha de modificarse. A este respecto, una planificación basada en cortes transversales invierte la acostumbrada y obliga a los especialistas a que integren su trabajo. Es un sistema nuevo que, como dijo Le Corbusier en un contexto diferente, hace que lo bueno sea fácil y lo malo, difícil. Y al operar así puede reconciliar a los ciudadanos con un crecimiento de todo punto inevitable.

ANDRÉS DUANY es uno de los más influyentes planificadores urbanos de EE.UU. Junto con su esposa, Elizabeth Plater-Zyberk, es fundador del Congreso para un Nuevo Urbanismo.

truir más autopistas y subdividir en grandes parcelas, que es una forma de zonificación exclusivista, de hecho acelerarían la expansión informe o perpetuarían las desigualdades sociales. Y hasta los proyectos bien concebidos pueden empeorar el crecimiento expansivo. Un reciente informe del Sierra Club criticaba una nueva parcelación, Hidden Springs en Boise, Idaho —apta para caminar, de utilización mixta, de eficaz consumo de energía—, por sus “buenas intenciones en tierra de nadie”. A pesar de los elementos atractivos del proyecto, su remota ubicación requiere nuevas infraestructuras y promueve la urbanización a lo largo de las carreteras de enlace.

Tras los sinsabores del aprendizaje, se ha producido una notable transformación en la planificación urbana. Incluso en Atlanta, ciudad emblemática de la expansión incontrolada, los urbanistas, empresarios y políticos que antes se oponían al crecimiento racional han llegado a considerarlo una cuestión de supervivencia. Los viejos talleres de Atlantic Steel en el centro de Atlanta se están convirtiendo en una comunidad residencial de utilización mixta orientada al transporte público. Una de las empresas mayores de la región, Bell South, ha anunciado que cerrará 75 oficinas suburbanas y las reagrupará en tres nuevas oficinas situadas en estaciones de ferrocarril.

En un acto de optimismo total, algunos directivos locales empiezan a considerar la moratoria sobre la construcción de autopistas del tribunal federal como una bendición, ya que ha permitido gastar fondos federales de transporte en mejoras muy urgentes para proyectos de transporte público, peatones, bicicletas y gestión del tráfico. Cuando finalmente se levante la moratoria —todavía se está preparando un nuevo plan de crecimiento—, la región habrá tenido un largo período de reflexión y planificación para pensar en su futuro. En ese momento Atlanta volverá a estar en el punto de mira. Si el crecimiento racional ha triunfado aquí, puede triunfar en cualquier parte.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ONCE THERE WERE GREENFIELDS: HOW URBAN SPRAWL IS UNDERMINING AMERICA’S ENVIRONMENT, ECONOMY AND SOCIAL FABRIC. F. Kaid Benfield, Donald D.T. Chen y Matthew D. Raimi. Natural Resources Defense Council, 1999.

PICTURE WINDOWS: HOW THE SUBURBS HAPPENED. Rosalyn Fraad Baxandall y Elizabeth Ewen. Basic Books, 2000.

SUBURBAN NATION: THE RISE OF SPRAWL AND THE DECLINE OF THE AMERICAN DREAM. Andrés Duany, Elizabeth Plater-Zyberk y Jeff Speck. North Point Press, 2000.

Puede encontrarse más información en www.brookings.edu/es/urban/urban.htm, www.smartgrowthamerica.com y www.sprawlwatch.org en Internet.

Taller y laboratorio

Shawn Carlson

Calibrando con frío

Tras haber pasado una vida en la suave y fragante California, acabo de trasladarme a Rhode Island. Me agrada, pero debo aclimatarme a sus fríos rigurosos. La invernada del nordeste me ha obligado también a comprobar el funcionamiento de algunos de mis instrumentos de laboratorio, en particular de mis termómetros electrónicos de intemperie.

En general, los termómetros se calibran determinando su lectura a dos temperaturas conocidas e interpolando entre ellas. Hasta ahora, siempre calibré mis termómetros con un límite inferior de cero grados Celsius. Tal proceder me resultaba adecuado porque en San Diego el tiempo raramente baja de cero. No puedo decir lo mismo de Nueva Inglaterra. En su búsqueda de la precisión, los meteorólogos aficionados que viven en climas fríos deberían realizar calibraciones exactas con temperaturas de congelación.

Mi centro de temperaturas se basa en un termopar del tipo J (*figura 2*). Basta con desprender el aislante y entrelazar los extremos para formar el sensor. El circuito integrado al que está unido asciende a unos veinticuatro dólares (Analog Devices AD594CQ, que vende Pioneer-Standard Electronics; visite www.ied.pios.com/onestop/), lo que puede parecer algo caro, pero es un dispositivo que vale lo que cuesta, pues compensa automáticamente algunos de esos sutiles efectos que acostumbran complicar las mediciones termopáricas. Este sencillo montaje mantiene su precisión de un grado si las temperaturas se interpolan con los valores de la tabla que acompañamos.

Pero las cosas pueden hacerse unas diez veces mejor si calibramos nuestros propios termómetros. Habitualmente yo registraba la tensión de salida del circuito estando el termopar sumergido en una suspensión espesa de hielo pulverizado en agua destilada, con lo que tenía los cero grados Celsius, y también en agua hirviente, con lo que tenía los 100 grados Celsius. Esta sigue siendo una buena temperatura de extremo de calibración. Téngase en cuenta, no obstante, que la temperatura de ebullición del agua depende de la presión atmosférica (y ésta cambia con la altitud y con el estado atmosférico). Por tanto, hay que conocer la presión barométrica para determinar el punto de ebullición exacto del agua; para ello podemos servirnos de uno de los cómodos calculadores disponibles en Internet (por ejemplo, www.biggreenegg.com/boilingPoint.htm).

1. En un termo de boca ancha, con una solución de alcohol y hielo seco de dióxido de carbono en su interior, se enfría un tubo de ensayo lleno de mercurio congelado (a –38,9 grados Celsius). Este sencillo aparato sirve de patrón de calibración a baja temperatura para un termómetro de precisión

Para aprender a construir un buen patrón de baja temperatura, recurrí a mi buen amigo George Schmermund. Tras perfeccionar su cuba de punto triple (descrita en esta sección en abril de 1999), George inició el desarrollo de otros patrones de temperatura, incluido uno basado en el punto de congelación del mercurio, que cae en los –38,9 grados C. Aunque se trata de un veneno potente, el mercurio puede manejarse sin ningún peligro cumpliendo estrictamente algunas medidas de sentido común.

Se empieza llenando hasta la mitad de alcohol isopropílico al 91 por ciento un termo de acero inoxidable de boca ancha. (Al 91 por ciento fue el menos disuelto que George pudo conseguir en la droguería de su ba-

rrio.) Seguidamente, hay que hacerse con un bloque pequeño de anhídrido carbónico congelado en algún almacén de licores. La masa de hielo seco se envuelve en una toalla y con un martillo se reduce a pequeños fragmentos. Algunos de éstos se trasladan al termo con unas pinzas y la mezcla se agita con una cuchara de madera hasta que deja de burbujear.

Esa efervescencia libera una nube altamente inflamable de vapor de alcohol, por lo que hay que trabajar junto a un ventilador que lance un fuerte caudal de aire fresco sobre la zona de trabajo. Y, por supuesto, cigarrillos y llamas abiertas deben mantenerse muy lejos. Para recoger el líquido que pudiera escaparse, colóquese el termo dentro de un recipiente de guardar alimentos. Obsérvese que nunca debe echarse alcohol a la temperatura ambiente sobre esa solución fría. El líquido enfriado contiene una gran cantidad de anhídrido carbónico; si súbitamente se le calienta añadiéndole más alcohol, el CO_2 saldrá proyectado de la solución, provocando una erupción de masa espumosa desde el termo.

Pero antes de adentrarnos en las dificultades de conseguir el líquido frío, hemos de contar con un "pozo de termómetro"; o sea, algo que proteja al termopar cuando esté sumergido en el mercurio.

Con el pozo de termómetro y el baño frío, una calibración de temperatura en el punto de congelación del mercurio se efectúa fácilmente. Procurémonos un tubo de ensayo grande con un tapón de caucho de su medida en algún suministrador de artículos científicos (uno es Fisher Scientific; www.fisherscientific.com). Hay que asegurarse de que el tapón tenga un orificio del tamaño adecuado para aceptar el pozo de termómetro, hundido éste la longitud suficiente para que su extremo quede a unos dos centímetros del fondo del tubo de ensayo. Llenaremos de mercurio dos tercios del tubo. Echese un poco de alcohol en el pozo e insértese el termopar hasta un centímetro del fondo; si es posible, sin que toque el vidrio. A continuación, se sumerge el pozo en el mercurio y se ajusta bien el tapón. Por último, con gran cuidado se coloca todo el conjunto dentro del termo con la solución de alcohol enfriada.

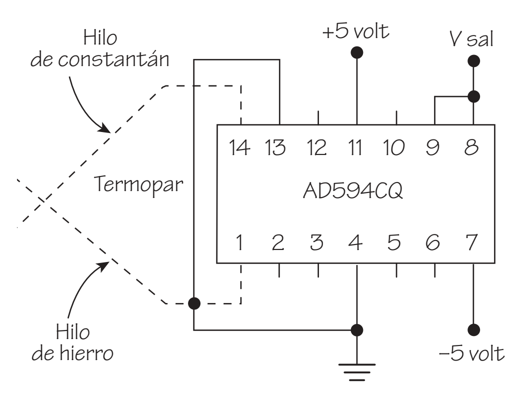
Andese con tiento. La presión de vapor del mercurio a temperatura ambiente es lo bastante elevada para que una exposición prolongada pueda producir daños cerebrales. Las embarazadas y los niños no deben acercarse. Se trabajará en una zona bien ventilada, con ropas protectoras y gafas de seguridad. Mantendremos con cierre estanco los recipientes que contienen mercurio. Y como los derrames son de limpieza notoriamente difícil, antes de empezar pensaremos en los modos en que podría producirse un accidente. Por ejemplo, debemos asegurarnos que podemos contener cualquier derrame manteniendo el tubo de ensayo lleno de mercurio cerca de la mesa y sobre un recipiente de alimentos. El plástico, una vez contaminado, nunca puede limpiarse por completo, por lo que se le debe colocar una etiqueta perenne que diga "¡Peligro! Contaminado con mercurio. No emplear para alimentos."

Debo recalcar que el mercurio se numera con justicia entre los residuos peligrosos. Nos atendremos a las normas legales.

Para efectuar la calibración, obsérvese la lectura del termómetro conforme la temperatura desciende rápidamente. Cuando el mercurio empiece a congelarse, la tensión permanecerá casi constante y no volverá a disminuir hasta que todo el mercurio se haya solidificado. Tras observar que la tensión baja una segunda vez, se retira el tubo de ensayo y se coloca en un soporte de base firme. Regístrese luego la salida del circuito conforme se funde el mercurio. También entonces se mantendrá constante en un voltaje durante un rato. Si la tensión se estabiliza en el mismo valor que antes, podemos estar seguros de que la meseta de temperatura se presentó exactamente a –38,9 grados C.

Si las dos tensiones (para solidificación y para fusión) resultan distintas, es que el mercurio está contaminado. Para purificarlo, se sumerge el tubo de ensayo en el alcohol enfriado y se espera hasta que se haya solidificado la mitad del metal. El líquido restante se vierte en un recipiente aparte para residuos de mercurio. Repitiendo una segunda vez esas operaciones se consigue un mercurio de una pureza mínima del 99,99 por ciento. Prodúzcase la cantidad necesaria y luego realícese la calibración descrita.

Una vez determinadas las tensiones de salida para el punto de solidificación del mercurio y para los puntos de solidificación y de ebullición del agua, confrontaremos los valores con la tabla que aportamos. Ello revelará de inmediato las correcciones a introducir en los valores tabulados en las temperaturas de –38,9, 0 y 100 grados. Se podrán entonces interpolar todos los cambios a introducir en cada una de las temperaturas del intervalo, que abarca incluso las mas frías noches de invierno que jamás haya de conocer Rhode Island. Mi estación meteorológica casera vuelve a estar en servicio; al menos mientras no decida mudarme al polo Sur.



2. El circuito integrado AD594CQ de Analog Devices hace de un termopar tipo J un termómetro de gran precisión para una estación meteorológica casera

Temperatura (grados Celsius)	Salida (volt)
–38,9	–0,365
–20	–0,189
–10	–0,094
0	0,003
10	0,101
20	0,200
25	0,250
30	0,300
40	0,401
50	0,503
60	0,606
80	0,813
100	1,022

La Society for Amateur Scientists ofrece un kit para este proyecto hasta diciembre de 2001. El paquete contiene un tubo de ensayo de buen tamaño, soplado a mano, con el fondo plano, un tapón de caucho y un pozo de termómetro de vidrio, una guarda antiderrame de plástico, guantes protectores y un frasco aislado para la solución de hielo seco. El mercurio y el alcohol no están incluidos. Precio: 150 dólares. Puede pedirse a la Society for Amateur Scientists, 5600 Post Road, 114-341, East Greenwich, RI 02818.

Ian Stewart

Campeones de salto

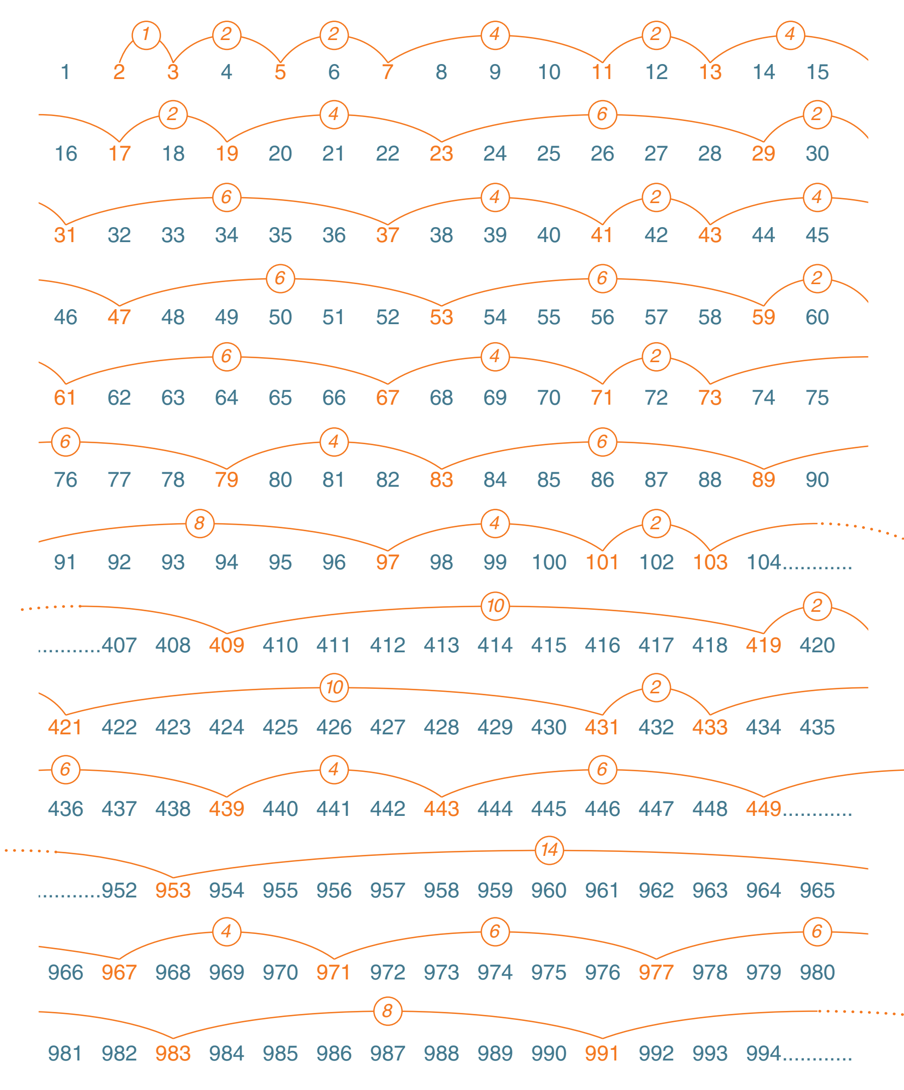
Están las matemáticas repletas de sorpresas. ¿Quién habría imaginado, por ejemplo, que de algo tan sencillo como los números naturales (1, 2, 3, 4,...) iba a nacer algo tan desconcertante como los números primos (2, 3, 5, 7, 11,...)? Los números naturales siguen una pauta obvia: para cualquiera que tomemos es fácil determinar el número siguiente. No así con los números primos. Y sin embargo, conceptualmente, el paso de los números naturales a los números primos es bien sencillo: basta tomar aquellos números que no tengan divisores propios.

Es mucho lo que se sabe sobre números primos, y no faltan potentes fórmulas que den buenas aproximaciones de ellos cuando no tenemos los valores exactos. El "teorema de los primos" establece que el número de enteros primos menores que x es aproximadamente de $x/\ln x$, donde ln denota el logaritmo natural (o neperiano). Así, por ejemplo, sabemos que existen aproximadamente $4{,}3 \times 10^{97}$ números primos que tengan menos de 100 dígitos. Su número exacto, en cambio, es un completo misterio.

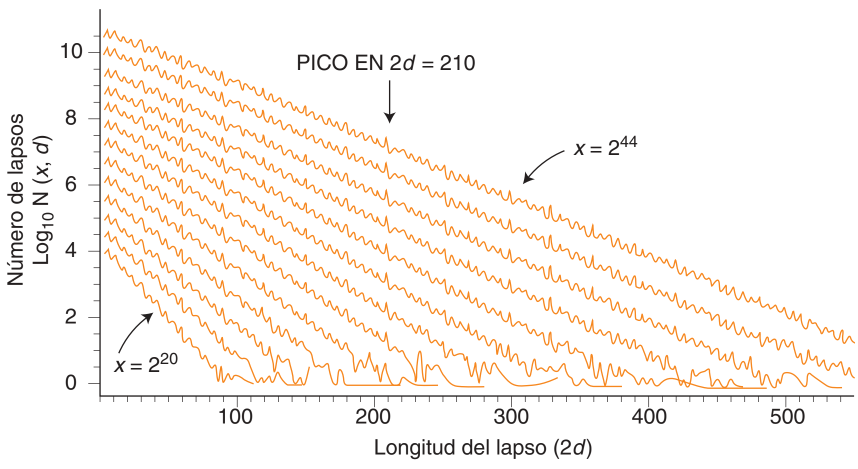
Andrew Odlyzko Michael Rubinstein y Marek Wolf, estudiosos de la separación entre números primos consecutivos, en un artículo publicado en *Experimental Mathematics* (vol. 8, n.º 2, 1999) se ocuparon del siguiente problema: ¿Cuál es la distancia más frecuente entre números primos consecutivos menores que x? Esta cuestión fue planteada a finales de los setenta por Harry Nelson. Posteriormente, John Horton Conway acuñó la expresión "campeones de salto" para describir a tales números.

Los números primos menores que 50 son 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, 37, 41, 43 y 47. La secuencia de lapsos —las diferencias entre cada número primo y su precedente— es 1, 2, 2, 4, 2, 4, 2, 4, 6, 2, 6, 4, 2 y 4. El número 1 aparece una sola vez, porque todos los números primos, a excepción del 2, son impares. Todos los demás tramos corresponden a lapsos pares. En esta secuencia, el 2 aparece seis veces, el 4, cinco veces, y el 6, solamente dos. Así, cuando x = 50, el lapso más común es 2, y por ello tal número es el campeón de salto.

En ocasiones son más de uno los lapsos igualmente frecuentes. Por ejemplo, cuando x = 5, los lapsos son de 1 y 2, y cada uno se presenta una vez. Para valores más elevados de x, el 2 conserva el título hasta llegar a x = 101, momento en el que 2 y 4 quedan empatados (*figura 1*). A partir de ahí el campeonato de salto se lo disputan entre el 2 y el 4, hasta llegar a x = 179, en que 2, 4 y 6 quedan en empate a tres. Luego desaparece el reto entre 4 y 6, y el 2 permanece campeón invicto hasta x = 379, momento en que empata con 6. Desde 389 en adelante el campeón más frecuente es el 6, con empates ocasionales con el 2 o el 4, o con ambos. Pero cuando x va desde 491 hasta 541, el campeonato de salto retorna al 4. Desde x = 947 en adelante, el trofeo pertenece en exclusiva al 6, y una investigación con



1. Las distancias más frecuentes entre números primos consecutivos son 2, 4 y 6 para las series que lleguen hasta 1000. No se conocen los campeones de salto para series muy largas de números primos



2. La representación semilogarítmica permite ver la dependencia del número de saltos entre números primos consecutivos menores que x *con respecto a la longitud del lapso* (2d). *La gráfica induce a pensar que 210 puede ser un campeón de salto*

el auxilio de ordenador revela que así continúa hasta, por lo menos, $x = 10^{12}$.

Parece razonable concluir que, dejada aparte cierta competencia inicial con 1, 2 y 4, el único campeón a largo plazo es 6. Pero incluso una pauta que persiste hasta números del orden del billón podría perfectamente cambiar al aumentar todavía más los números. Y aquí es donde surge la sorpresa. Odlyzko y sus colegas proporcionan un persuasivo razonamiento de que en las cercanías de $x = 1{,}7427 \times 10^{35}$ el campeón de salto cambia de 6 a 30. Y conjeturan, asimismo, que volverá a cambiar otra vez, pasando a ser 210, cerca de $x = 10^{425}$.

Excepto para el 4, los campeones de salto conjeturados encajan en una elegante pauta, que resulta obvia si los descomponemos en factores primos:

$$2 = 2$$
$$6 = 2 \times 3$$
$$30 = 2 \times 3 \times 5$$
$$210 = 2 \times 3 \times 5 \times 7$$

Cada número se obtiene multiplicando los números primos consecutivos. Tales productos son llamados "primoriales" —porque son como los números factoriales, pero con primos— y los siguientes son 2310, 30.030 y 510.510. En su artículo, Odlyzko y coautores enuncian su "conjetura del campeonato de salto": los campeones de salto son los números primoriales, más el 4.

He aquí una breve explicación de su análisis. Quien haya observado la sucesión de los números primos habrá notado que de cuando en cuando hay dos números impares consecutivos que son primos; así, 5 y 7, 11 y 13, 17 y 19. La conjetura de los primos gemelos enuncia que existe una infinidad de tales pares. Está basada en la idea de que los números primos se presentan "al azar" entre los impares, con una probabilidad basada en el teorema de los números primos. Este planteamiento puede parecer absurdo —pues un número, o es primo, o no lo es; la probabilidad no interviene— pero en este tipo de problemas se trata de un absurdo razonable. Según un cálculo de probabilidades, no hay posibilidad de que la lista de primos gemelos sea finita.

¿Y qué decir de la existencia de ternas de números primos consecutivos? Solamente existe un ejemplo, a saber, 3, 5, 7. Dados tres números impares consecutivos, uno de ellos será forzosamente múltiplo de 3, y tal número no puede ser primo a menos que se trate del propio número 3. Sin embargo, las series $p, p + 2, p + 6$ y $p, p + 4, p + 6$ no pueden ser descartadas por tales razonamientos; antes bien, parecen ser bastante comunes. Por ejemplo, tenemos una serie del primer tipo en 11, 13, 17 y de nuevo en 41, 43, 47. Las series de segundo tipo empiezan en 7, 11, 13, y de nuevo en 37, 41, 43.

Hace unos 80 años, Godfrey Harold Hardy y John Edensor Littlewood analizaron pautas de este tipo en colecciones de primos mucho mayores. Valiéndose del mismo tipo de cálculo probabilístico al que aludí para los primos gemelos, dedujeron una fórmula precisa para el número de secuencias de primos que contienen pautas de lapsos prefijadas. La fórmula, complicada, puede consultarse en el artículo de *Experimental Mathematics* antecitado y las referencias que contiene.

Partiendo del trabajo de Hardy y Littlewood, Odlyzko y sus colegas dedujeron una fórmula para $N(x, d)$, valor que denota el número de tramos entre primos consecutivos separados por un lapso de tamaño $2d$ y los números primos son menores o iguales que x. (Se usa aquí $2d$ en lugar de d porque la longitud del lapso tiene que ser par.) Sólo es de esperar que la fórmula sea válida cuando $2d$ sea grande, y x, muchísimo mayor. La figura 2 permite observar cómo depende $\log N(x, d)$ de la longitud del tramo, $2d$, para trece valores de x que van desde 2^{20} hasta 2^{44} (en esta gráfica, log denota al logaritmo de base 10). Cada una de las líneas del trazado es aproximadamente recta, aunque con muchísimos altibajos. Los picos situados sobre $2d = 210$ son especialmente prominentes; por eso es 210 el favorito para campeón de salto correspondiente a valores muy grandes de x. (Y todavía resaltaría más de no haber sido aplanado por la representación logarítmica.) Tal clase de información induce a pensar que la fórmula $N(x, d)$ no se descarría demasiado.

Ahora bien, si $2d$ va a ser un campeón de salto, el valor de $N(x, d)$ tiene que ser grande. La mejor forma de conseguirlo es que $2d$ tenga muchos factores primos distintos. Y con esta condición, $2d$ debería, también, ser lo menor posible, así que las elecciones más plausibles para $2d$ son las primoriales. El 4, conocido campeón de salto, constituye, presumiblemente, una excepción; en cualquier caso, aparece a un tamaño en el que la aproximación dada por la fórmula $N(x, d)$ no es buena. La fórmula permite además calcular aproximadamente cuándo un primorial determinado va a relevar al anterior en su papel de campeón de salto.

¿Qué le queda por hacer a la matemática recreativa? Demostrar la Conjetura del Campeón de Salto, claro está. O refutarla. Si el lector no consigue ninguna de estas cosas, pruebe a buscar otras propiedades interesantes de los lapsos entre números primos. Por ejemplo, ¿cuál es el salto menos frecuente (que realmente aparece) entre primos consecutivos menores que x? ¿Cuál es el lapso cuya frecuencia más se aproxima al número medio de veces? Que yo sepa, se trata de preguntas poco estudiadas, incluso para valores relativamente pequeños de x.

IDEAS APLICADAS

Madhusree Mukerjee

Pañales desechables superabsorbentes



Quien en los últimos diez años haya despojado a un bebé de su pañal se habrá sorprendido no tanto de lo sucio cuanto de lo pesado de la prenda. Los pañales modernos pueden retener kilos de orines y seguir pareciendo perfectamente secos, lo que explica por qué son cada vez menos los bebés que usan pañales de tela.

Absorbencia tan excepcional se la confieren los poliacrilatos, una familia de polímeros hidrófilos. El más sencillo de ellos es el poliacrilato de sodio, que puede admitir agua destilada hasta unas 800 veces su propio peso. Desde luego, en la orina hay algo más que agua. Las sales disueltas y los iones reducen la absorbencia en un factor superior a 10. Las principales marcas de pañales emplean las combinaciones de poliacrilatos que mejor resultan; pero pudiera que sea más fácil dar con la receta de una bomba atómica que con la de un relleno de pañales. Se trata de un sector industrial muy competitivo.

Como mantienen la piel más seca que los de tela, los pañales desechables quizá sean mejores para los bebés, aunque en la práctica el margen es incierto, pues a los bebés usuarios de pañales de tela se les muda con mayor frecuencia y parece que sufren menos escoceduras. Los partidarios de los pañales de tela señalan el enorme costo ecológico de los pañales desechables. La ecuación ecológica global de los pañales lavables frente a los desechables es difícil de cuantificar, pero los segundos forman una porción considerable del flujo de residuos urbanos.

En los países tropicales, los bebés suelen prescindir de los pañales; es más barato limpiar los suelos. De hecho, tal como la madre que esto escribe fue informada (a veces por extranjeros virtuales) durante una visita a la India, se considera insólitamente cruel someter a un bebé al agobiante confinamiento de un pañal. Resultado: ni escoceduras ni basuras.

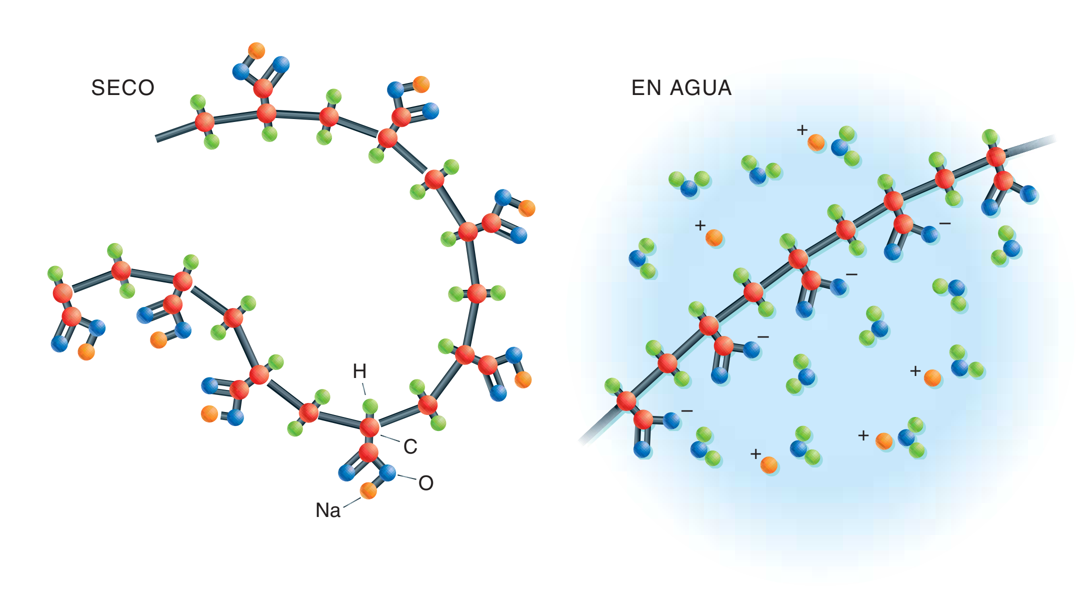
POLIPROPILENO

FIBRA COMPUESTA

POLIETILENO

POLIACRILATO

LA MAYORIA DE LOS MATERIALES empleados en los pañales desechables son sintéticos. La capa interna está hecha de polipropileno; es suave y se conserva seco, alejando de la piel a los fluidos. El centro es de un polvo superabsorbente de poliacrilato combinado con celulosa peluda. Una capa de fibra (de celulosa o sintética) contrarresta la gravedad distribuyendo el fluido por toda la superficie, sin permitir que se remanse en un mismo punto. La capa externa es de polietileno microporoso, que retiene el fluido y deja pasar el vapor. El conjunto se une con adhesivos: unos puños de polipropileno hidrófobo elastificado en torno a los muslos impiden la salida del fluido; el pañal se sujeta al bebé mediante bandas adhesivas o cierres velcro.



EN EL POLIACRILATO DE SODIO los grupos carboxilato de sodio cuelgan de la cadena principal. Al contacto con agua el sodio se desprende, dejando sólo iones carboxilo. Estos, al estar cargados negativamente, se repelen entre sí, por lo que el polímero se desenrolla y absorbe agua, que es atraída hacia los átomos de sodio. Asimismo, el polímero posee unos enlaces transversales débiles, con el efecto de formar una estructura tridimensional. Además, su peso molecular es de más de un millón; no se disuelve, sino que se gelifica.



LOS PAÑALES DESECHABLES de mayor tamaño pueden admitir hasta casi dos litros de agua. El secreto: los superabsorbentes.

¿Sabía usted que...?

- Los superabsorbentes son aplicables no sólo a la higiene personal (pañales, tampones de incontinencia para adultos, etc.), sino también para limpiar residuos médicos en los hospitales, para proteger de las filtraciones de agua a centrales eléctricas y cables ópticos, para eliminar el agua de los combustibles de aviación y para acondicionar la tierra de los jardines para que retenga el agua. Sin mencionar esos juguetes que se despliegan al ponerlos en el agua.

- Un estudio publicado en 1999 descubría que ciertos ratones expuestos a pañales desechables padecieron irritaciones en ojos, nariz y garganta, semejantes algunas a ataques de asma. Se sospechó la responsabilidad de los gases desprendidos por los disolventes y otros compuestos químicos presentes en los pañales. En 1980 se retiraron del uso en compresas los superabsorbentes tras un brote de síndromes de choque tóxico.

- Los bebés que visten pañales de tela acostumbran usar el inodoro un año antes que los que emplean desechables. Aunque ello podría ser una cuestión de usos culturales, probablemente también se trate de que los desechables son tan absorbentes, que a menudo ni el niño ni su cuidador saben cuándo aquél se descarga; al pequeño no le es fácil asociar el acto con el uso del inodoro.

James Burke

Podría haber sido el obelisco de Nelson

Apuesto a que la mayoría de los turistas que visitan Trafalgar Square y vuelven con un esguince cervical (me pasó a mí) en su intento de atisbar al almirante, ignoran que se encarama sobre lo que pudo ser el obelisco de Nelson. Así lo había concebido E. H. Baily, a quien se encargó la estatua como premio de consolación en 1840 tras perder el concurso de proyecto de la columna como monumento al héroe.



Y no es que Baily necesitara trabajo, labrándose como estaba otros destinos: el Palacio de Buckingham, Marble Arch y la National Gallery. El ascenso de Baily fue meteórico. De un don nadie provinciano pasó a recibir la medalla de oro de la real academia a sus insultantes veintitantos años. En gran medida gracias a la ayuda de su maestro, John Flaxman (a quien rechazaron el diseño de una estatua de Bretaña de 60 metros para la colina de Greenwich). Flaxman había pasado un septenio en Italia dibujando cuanto se desmoronara, lo que le valió fama a su regreso, como también la ganó por realizar más conjuntos funerarios que nadie en la historia (ocho sólo en la catedral de Chichester).

Antes, hacia 1775, había dedicado varios años a fabricar modelos de cera para medallones de cerámica, frisos y objetos de guisa similar pergeñados por Josiah Wedgwood, el primer alfarero con producción de mercado y científico aficionado (su hija sería la madre de Charles Darwin, quien a su vez se casaría con su nieta). Mientras desenredan lo anterior, déjenme añadir que el novedoso catálogo de ventas de Wedgwood fue algo equivalente en pleno siglo XVIII a la compra por Internet, con reembolso garantizado incluido. Wedgwood era un tipo hábil con los clientes. También inventó un pirómetro para controlar la temperatura de sus hornos a partir de la disminución de volumen que el calor producía en pequeños cilindros de arcilla.

Las técnicas pirométricas se desarrollaron en 1830 (en una fase avanzada de su carrera) por John Frederic Daniell, químico inglés que empezó con el refinamiento del azúcar, pasó a la fabricación de gas de hulla y de ahí, como es de esperar, a la invención de la célula de Daniell (la primera pila de corriente continua), luego a la meteorología y a una asesoría de la Marina sobre los rayos. Como el tiempo en Inglaterra es predominantemente húmedo, no sorprenderá que en 1824 Daniell escribiera un artículo magistral sobre cómo conseguir niveles de humedad adecuados para un invernadero.

Lectura obligada para Joseph Paxton, jardinero encargado (y compañero de viaje) del duque de Devonshire. En 1850, tras años de experiencia en la construcción de un conservatorio ducal coqueto, Paxton tuvo una visión clara del aspecto que debía presentar el edificio destinado a la Exposición Universal. Su proyecto, garabateado en papel secante, obtuvo el premio. Destinado a ser la madre de todos los edificios de cristal alcanzaba 33 metros de alto y ocupaba unas siete hectáreas. Cuando se construyó en 1851, se le llamó el Palacio de Cristal, y Paxton se convirtió en Sir Joseph. Se dice que se inspiró en el diseño estructural de la base de los nenúfares amazónicos, tras recibir en 1849 una de esas enormes flores que empezaban a llegar a Europa.

Victoria regia (así se llamó la planta en homenaje a la reina) terminó siendo objeto de culto victoriano, repleta de connotaciones imperiales. Descubiertas por un gran explorador británico (en verdad, un inmigrante alemán de primera generación), Robert Hermann Schomburgk, cuando se encontraba en lo que entonces era la Guiana británica (ahora Guayana) trazando la línea de Schomburgk que debía mostrar a los tipos del lado venezolano por dónde pasaba la frontera para que no osaran cruzarla.

Por supuesto, otras personas reclamaron haber descubierto antes el nenúfar, el más colorista de ellos tal vez (a ver si así consigo insertarlo) fuera el botánico francés Aimé Bonpland, quien escribió desde Montevideo para reclamar la prioridad. Bonpland empezó con buen pie en 1799, pasando cinco años en la selva como secretario de expedición nada menos que del mayor aventurero del mundo, Alexander von Humboldt, quien conocería una fama inmensa. ¿Qué pudo suceder para apartarle de Humboldt? Al finalizar el Viaje (60.000 especímenes, 3000 nuevas especies, diez mil kilómetros y un sinfín de mediciones), en 1816 Bonpland tropezó en Londres con alguien que le hizo una oferta que no podía rechazar: organizar un museo de historia natural de nueva planta en Buenos Aires. El dinero no debía constituir ningún problema.

Desafortunadamente, cuando llegó a Argentina los burócratas dijeron no saber nada del asunto. Ni había, por supuesto, dinero. Durante un tiempo se defendió con un puesto de frutas y verduras. En 1820 se trasladó a Paraguay, tuvo problema con las autoridades y pasó nueve años entre rejas. Puso las manos luego en asuntos botánicos varios, tráfico de armas, uniformes militares, espionaje y medicina. Y todo ello gracias a su encuentro con el que sería primer presidente de

Argentina, Bernardino Rivadavia, que también entró en la historia como fundador de la Universidad de Buenos Aires y por demasiado libertario como para durar en el cargo.

Parte del cual (libertarismo) pudo haberlo desarrollado Rivadavia, durante su excursión inglesa, al dar con Jeremy Bentham, ya reputado radical y pepito grillo de lo humano y lo divino. Bentham aclaró algunos de los más embrollados asuntos del sistema legal inglés que nadie y, en el mejor sentido, fue benefactor de los que hacían el bien. Además de aconsejar a príncipes y potentados en cuestiones constitucionales, proporcionó una visión reformista de la ética, tributación, economía política, pobreza, jurisprudencia y administración colonial. Según parece resultó bastante diestro con el violín. Todo ello y la reforma penal, incluyendo el diseño de prisiones más humanas, el panópticon, con las celdas dispuestas en círculo alrededor de una garita de vigilancia central.

La idea se la proporcionó su hermano, Sam, que se pasó quince años pugnando por llegar a almirante de la armada rusa y que en determinado momento (mientras dirigía un muy novedoso astillero) construyó su oficina en el centro de talleres dispuestos radialmente de forma que pudiera controlar mejor las obras.

En 1795 Sam volvió a Inglaterra e hizo cosas innovadoras en las reales atarazanas, antes de que se atorara en su intento de reformar la complicada administración de los astilleros. En 1801 empero consiguió implantar una pérfida novedad propuesta por un monárquico francés emigrado y antiguo ingeniero jefe de Nueva York: Marc Brunel. Cuya idea consistía en la plena mecanización de las líneas de producción (en la fabricación de bloques de poleas para barcos, que en 1806 permitió que diez hombres fabricaran el mismo número de bloques que antes habían realizado ciento diez a mano). Le ahorró una fortuna a la Armada. Más tarde se conocería como el sistema americano de manufactura. Imagine la razón. (Doy una pista en la siguiente frase.)

En 1825 Brunel empezó la construcción del túnel Rotherhithe bajo el Támesis; la terminaría tras diecisiete años de huelgas. El encargado en apuros era su hijo, Isambard, predestinado a la gloria como uno de los ingenieros más preeminentes de la historia y de quien ya hemos mencionado tanto, que bastará indicar: el mayor barco del mundo, túneles, puentes, muelles, hospitales prefabricados, vías férreas y viaductos. Y (cosa infrecuente en un ingeniero) un montón de dinero. Algo del cual se gastó en una lujosa casa en Londres, donde para una habitación encargó algo de arte inspirado en Shakespeare de un pintor más conocido por retratar perros en todas las posturas y con todos los semblantes: perros abogados, perros plañideros, perros salvadores, perros durmientes. Si ladraba, Edwin Henry Landseer lo inmortalizaría. En 1859 subió de categoría con el encargo de esculpir cuatro leones de bronce.

Todavía pueden verse, desde el pie de lo que no es el obelisco de Nelson.

La Tierra

Física y química

ILIASTER. LITERATUR UND NATURKUNDE IN DER FRÜHEN NEUZEIT. Edición preparada por Wilhelm Kühlmann y Wolf-Dieter Müller-Jahncke. Manutius Verlag; Heidelberg, 1999. **LE PLIS DU TEMPS. MYTHE, SCIENCE ET H.-B. DE SAUSSURE.** Albert V. Carozzi et alii. Musée d'ethnographie; Ginebra, 1998. **IL CERCHIO DELLA VITA.** Dirigido por Walter Bernardi y Paola Manzini. Leo S. Olschki Editore; Florencia, 1999. **LE SCIENCE DELLA TERRA NEL VENETO DELL'OTTOCENTO.** Dirigido por Ezio Vaccari. Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti; Venecia, 1998.

THE DATING GAME. ONE MAN'S SEARCH FOR THE AGE OF THE EARTH, por Cherry Lewis. Cambridge University Press; Cambridge, 2000.

LOOKING INTO THE EARTH. AN INTRODUCTION TO GEOLOGICAL GEOPHYSICS, por Alan E. Mussett y M. Aftab Khan. Cambridge University Press; Cambridge, 2000. **EARTH SYSTEMS. PROCESSES AND ISSUES.** Dirigido por W. G. Ernst. Cambridge University Press; Cambridge, 2000. **THE EARTH'S MANTLE. COMPOSITION, STRUCTURE, AND EVOLUTION.** Dirigido por Ian Jackson. Cambridge University Press; Cambridge, 2000.

Quizá sea la geología una de las disciplinas que más partido le esté sacando al progreso paralelo en astrofísica, química e instrumentación. De la naturaleza desconcertante del basalto para los renacentistas (*Iliaster. Literatur und Naturkunde in der frühen Neuzeit*) a su comprobado origen magmático media un abismo. Hay, empero, en ese libro dedicado a Joachim Telle un espléndido ensayo de Fritz Krafft sobre la filología e historia natural de la roca, que compendia el suave tránsito del legado clásico, pliniano, a la mineralogía y metalurgia de Georgius Agricola. Por ser epítome del esfuerzo del hombre por conocer su medio, a lo largo de muchos siglos, lo traemos a colación. Tuvo ese empeño otro punto de inflexión en la segunda mitad del siglo XVIII, cuando a la observación se suma la cartografía y topografía. Y a la "geografía subterránea" (estratigrafía) se agrega la "geografía superficial" (el relieve).

Los grabados famosos de las tareas e ingenios que ilustran el *De re metallica* del padre de la mineralogía dilatan su horizonte con los mapas del fundador de la geología de campo (*Le Plis du Temps*). El dibujante se hace inseparable del científico. M.-T. Bourrit de H.-B. de Saussure. El naturalista guía la mano del artista. Si de representar el Nant d'Arpenaz se trata, Bourrit, le indica Saussure, debe situarse en posición de captar las capas concéntricas en toda su extensión, las capas horizontales que se encuentran en la base de la cascada, las capas verticales que caen a plomo sobre las horizontales y las capas regulares y horizontales de un roquedo del fondo.

Saussure traslada a la montaña la inquietud naturalista, que rezuman, por ejemplo, los cuadernos de navegación de Bougainville, troquelados en el *Voyage autour du monde* (1771). Pero no se detiene en el éxtasis contemplativo. Busca una explicación coherente, una teoría, del mecanismo de formación de las montañas, y lo encuentra, tras muchos pasos a ciegas, en lo que llama compresiones horizontales antagonistas, poniendo con ello las bases de la tectónica tangencial moderna. Albert Carozzi, geólogo él y especialista en el ginebrino, recrea las etapas sucesivas de esa peripecia intelectual, apoyado sobre todo en los manuscritos que encierran la clave interpretativa de los *Voyages dans les Alpes, précédés d'un essai sur l'histoire naturelle des environs de Genève* (1779-1796).

De acuerdo con el dogma "neptunista", los granitos constituían las rocas primitivas formadas por diversos minerales precipitados químicamente y cristalizados en el fondo de un océano universal en retirada. Sobre las masas graníticas se irían depositando otras rocas, de origen acuoso y conformadas por procesos químicos, mecánicos y biológicos; a saber, los gneiss, los esquistos micáceos primitivos, las rocas de "transición", las calcáreas, y esquistos secundarios fosilíferos. Las rocas terciarias aluviales, de origen mecánico, flanquearían también los márgenes de las primarias. Pero la teoría, entendía Saussure, no aportaba ningún concepto dinámico de deformación o pliegue.

¿Cómo explicar, pues, la estructura de los Alpes? Observa, de entrada, que las capas rocosas, lejos de ser horizontales o levemente inclinadas, muestran una pendiente cada vez más inclinada hacia la verticalidad en los esquistos primitivos. Tal vez, piensa, el granito podría también darse en estratos verticales. Y eso es lo que encontró. ¿Qué interpretación darle?

Carozzi desgrana la serie de mecanismos tectónicos invocados hasta llegar a su idea maestra de las compresiones antagonistas. Principia, son los años 1758-1772, con una secuencia hipotética de deposición, verticalidad y pliegues de rocas primitivas por cristalización submarina; apela, en una segunda hipótesis, a una inversión subterránea de origen desconocido. Cree hallar, es la tercera hipótesis (1774-1780), el concepto tectónico unificador en una fuerza vertical subterránea. Y entre 1780 y 1796 elabora la cuarta hipótesis, según la cual la fuerza sísmica sería horizontal con una componente vertical. Del conjunto de los Alpes puede predicarse la acción de una compresión horizontal generadora de pliegues. No existe, pues, diferencia genética fundamental entre capas sedimentarias verticales y capas plegadas; se trata de dos aspectos del mismo proceso. Las compresiones horizontales antagónicas expresan fuerzas sísmicas que proceden del exterior de la cordillera.

Por sus observaciones sobre depósitos estratificados calcáreos y sus investigaciones vulcanológicas, Lazzaro Spallanzani entra con derecho propio en el elenco de los pioneros de la geología (*Il Cerchio della Vita*). Contemporáneo de Saussure, los últimos volúmenes de los *Voyages dans les Alpes* coinciden con los *Viaggi alle due Sicilie ed in alcune parti dell'Apennino* del abate. Pero lo que en aquél es reflexión intelectual, en éste es repetición en el laboratorio de las observaciones de campo. En



Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799

sus viajes, Spallanzani se acompaña de un termómetro, un barómetro, un microscopio, un imán, una garrafa de alcohol, reactivos químicos y numerosos botellines de cierre hermético.

En sus primeros años de docencia universitaria, se apoya en la naturaleza de los fósiles desenterrados para desembarazar a la orogénesis de la literalidad diluviana. Las montañas no se habrían formado todas a la vez, sino en un arco temporal de muchos siglos, según reflejaban los organismos petrificados. Recorrió los Alpes lombardos, describió lagos de alta montaña y visitó cuevas y minas. Y no rehuyó el debate litológico entre montañas primarias (compuestas de rocas compactas esquisto-cristalinas con vetas minerales y privadas de fósiles) y montañas secundarias (rocas calcáreas estratificadas y ricas en fósiles).

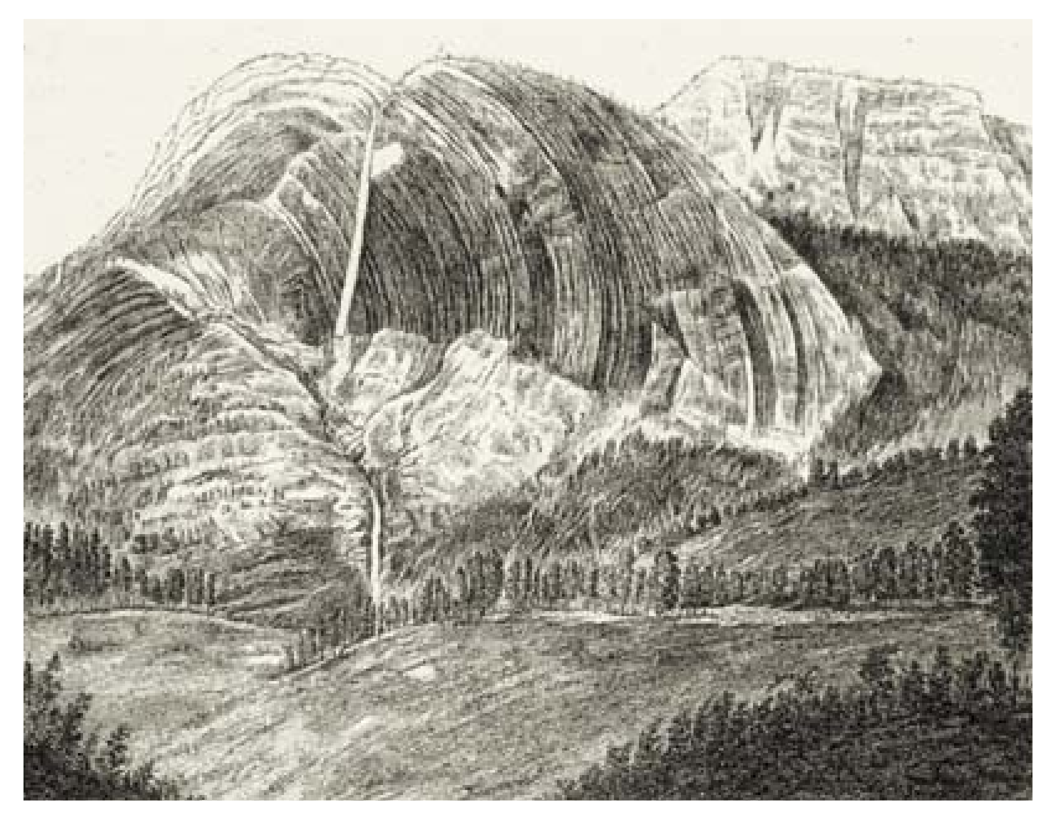
A la edad de 59 años emprendió el estudio del Vesubio, el Etna y las islas Eolias. Se mostró convencido de que los volcanes, alimentados en las profundidades de la tierra por enormes cantidades de "sulfuros de hierro" inflamados por "oxígeno", crecían gradualmente erupción tras erupción hasta erigir montañas imponentes.

Pero Italia no era sólo Spallanzani, ni siquiera en vulcanología (*Le Science della Terra nel Veneto dell'Ottocento*). Aunque también allí arraigaron las tesis neptunistas, sus planteamientos comenzaron a cuestionarse tras la introducción de los escritos de Johann Wallerius y Torbern Bergman. No se escapó el Véneto, en efecto, a la polémica entre neptunistas, abanderados por Abraham Gottolob Werner (1749-1817), defensores de un globo originario sumergido en un océano primordial y luego desarrollado por sedimentación de las rocas primitivas, y plutonistas, guiados por James Hutton (1726-1797), partidarios del papel esencial del vulcanismo en el origen de las montañas y los estratos de la corteza. La balanza se inclinó del lado werneriano, que se presentaba con el respaldo de la mineralogía y metalurgia.

Alberto Fortis intentó, sin fortuna, reivindicar la acción volcánica en *Mémoires pour servir à l'histoire naturelle de l'Italie*, de 1802. Mayor éxito tuvo su alumno Giambattista Brochi, pese a su inicial adopción del ideario neptunista en la *Memoria mineralogica sulla valle di Fassa in Tirolo*. Tras un decenio de viajes por Italia central y meridional, empieza a dudar: "El basalto europeo parece ser un producto del fuego". Esboza los elementos de una teoría de la tierra en la que el vulcanismo submarino halla una ubicación coherente.

El principio de la correlación cronológica entre rocas y fósiles, que se encuentra en la base de la geología estratigráfica del primer Ochocientos, fundaba un método de datación de las rocas cruzado, en el que las características litológicas del terreno recibían paridad de valor diagnóstico con las paleontológicas. Pronto se advierte que los estratotipos generales no se ajustan a las peculiaridades locales. Aparecen, además, "especies promiscuas", es decir, fósiles que no se corresponden con los lechos atribuidos a su edad. Pero, ¿qué edad tenía cada horizonte? ¿Cuál era, en última instancia, la edad de la Tierra? (*The Dating Game*).

En 1785, Hutton dictó ante la Regia Sociedad su *Theory of the Earth*, que subrayaba la inmensidad del tiempo geológico y la uniformidad de los procesos geológicos. Distinguía tres ciclos principales de formación del paisaje, de duración indefinida cada uno, y concluía: "El resultado, por tanto, de nuestra inquisición presente es que no hallamos vestigios de un comienzo, ni perspectiva de un fin". El año en que moría Hutton nacía



Dibujo del Nant d'Arpenaz realizado por M.-T. Bourrit

la cadena de desintegración que comenzaba con un átomo inestable de uranio, se producía un átomo de radio y se liberaba helio; el radio inestable se desintegraba en radón con liberación también de helio, y así a través de 14 pasos hasta que se descargaban ocho átomos de helio. El uranio, tan viejo como la propia Tierra, constituía el reloj soñado por los geólogos.

En 1907 Bertram Boltwood realizó un análisis sistemático de las rocas que contenían uranio. Observó que, además de helio, alojaban abundante plomo y postuló que era éste el producto estable final de la cadena de desintegración del uranio. Si Boltwood andaba en lo cierto, pensó el joven Arthur Holmes, podríamos obtener una edad midiendo la cantidad de plomo presente. Era su primer abordaje de la cuestión, *The Age of the Earth*, a la que dedicó toda su vida. Desde esa perspectiva elaboró una teoría de la Tierra, acorde con la disputada hipótesis de la deriva continental de Wegener, la convección del manto y la agregación meteorítica en la constitución del planeta.

Cuando en 1953 Claire Patterson determinaba que la Tierra alcanzó su masa actual hace 4555 millones de años, millón arriba, millón abajo, reconocía la intensa labor en ese terreno realizada por Holmes: "Deseo reiterarle mi deuda personal con su trabajo pionero. Fue inspirador e ingenioso en grado sumo". La postrera medición, aparecida en el primer número de *Nature* del 2001, otorga a la Tierra un pasado de 4400 millones de años; los autores han aplicado la técnica del uranio-plomo y la composición isotópica del oxígeno en una muestra de granos de circonio.

Los métodos geofísicos no se circunscriben a la datación radiométrica. Nos abren las propias entrañas de la Tierra (*Looking into the Earth*). Los pozos de sondeo aportan información valiosa sobre la subsuperficie, pero limitada a las rocas circundantes; en cambio, los métodos geofísicos, aunque menos exactos en la información suministrada, abarcan un volumen mu-

Charles Lyell, de influencia decisiva en la configuración de la geología moderna. Lyell retomó la cuestión donde la había dejado Hutton. Propuso que los procesos geológicos de su tiempo constituían la clave de lo que sucedió en el pasado. Visitó el volcán Etna y estudió el registro histórico de sus frecuentes erupciones. Advirtió que, cada vez que entraba en erupción, se añadía una nueva capa de lava, con el crecimiento consiguiente del monte. Conociendo la altura total del volcán, su tasa aproximada de erupción y la frecuencia de las erupciones, dedujo, podía determinar la edad del volcán. La cifró en varios cientos de miles de años. Las conchas fosilizadas bajo la primera capa de lava, virtualmente idénticas a las de los moluscos del Mediterráneo de su tiempo, le indujeron a pensar que los fósiles eran "recientes" y que la edad de la Tierra debía ser viejísima.

La geología había entrado en el sendero marcado por Lyell cuando, en 1862, Lord Kelvin pronunció una conferencia en la Regia Sociedad de Edimburgo que resultó ser un demoledor ataque contra sus métodos: "A lo largo de 18 años no ha dejado de rondarme por la cabeza que los geólogos han desestimado los principios de la termodinámica". Les recriminaba su cantinela sobre la uniformidad y persistencia de los procesos. Rechazaba la tesis de un tiempo terrestre ilimitado, sin principio ni fin. Doquiera se mirase, minas o perforaciones, insistía, la temperatura crece con la profundidad. De ello deducía que la Tierra se hallaba todavía en un período de enfriamiento. Si se conociera la temperatura de fusión de las rocas y la velocidad de enfriamiento, podría calcularse el momento de consolidación de la corteza terrestre. Fijó la edad en "20 millones de años, o tendríamos que encontrar muchísimo más calor del que medimos, y unos cuatro millones de años si no tuviéramos el calor que encontramos". Otros autores comenzaron a hablar de cien millones de años.

Samuel Haughton, al vincular espesor de los horizontes y antigüedad, resolvió que a un ritmo verosímil de algo más de cuatro metros cada 8616 años, el planeta tendría 2000 millones de años. Por temor a la irrisión, declaró 200 millones de años. Los métodos precisos vendrían de otro lado.

En 1902, Ernest Rutherford, trabajando con Frederick Soddy, anunciaba que un elemento podía transformarse en otro. El radio se convertía en radón (un metal en un gas). En

Renacimiento español

MATEMÁTICAS, COSMOLOGÍA Y HUMANISMO EN LA ESPAÑA DEL SIGLO XVI. LOS COMENTARIOS AL SEGUNDO LIBRO DE LA HISTORIA NATURAL DE PLINIO DE JERÓNIMO MUÑOZ, por Víctor Navarro Brotons y Enrique Rodríguez Galdeano. Universidad de Valencia, CSIC. Valencia, 1998.

Consta de un estudio preliminar de V. Navarro y la edición del texto latino y la traducción de los comentarios de Muñoz al segundo libro de la *Historia Natural* de Plinio, en colaboración con E. Rodríguez.

El estudio se inicia con los datos biográficos de Muñoz, la actividad docente y la obra de este destacado humanista valenciano. Fue matemático, astrónomo, teólogo y hebraísta (quizá fuera un converso o descendiente de conversos). Ocupó las cátedras de hebreo (1563) y matemáticas (1565) de la Universidad de Valencia. Desde 1578 hasta su muerte en 1592, ocupó la de matemáticas y astronomía en Salamanca.

La obra escrita de Muñoz es abundante. De la obra impresa destacan el *Libro del nuevo cometa* sobre la supernova de 1572 y un folleto breve relativo a un eclipse de luna y al cometa de 1577, ambos objeto de un trabajo anterior de Navarro. Entre la producción manuscrita destacan: un texto de astronomía y geografía; un tratado sobre los modelos de los movimientos del Sol, de la Luna y de los planetas; un comentario al tratado de astrología de Alcabitius y un tratado dedicado al astrolabio de Rojas. Además, una traducción latina del *Comentario al Almagesto* de Teón que incluye observaciones astronómicas, cálculos y tablas del propio Muñoz, y los *Comentarios* a Plinio, objeto del libro, redactados hacia 1568.

La *Historia Natural* de Plinio es la más importante de las obras sobre la naturaleza escritas por los autores latinos de la Antigüedad. En el Renacimiento, la difusión de esta obra conllevó la redacción de comentarios filológicos, interesados en el establecimiento del texto, y científicos, interesados en las cuestiones astronómicas. Entre éstos se encuentra el comentario de Muñoz. Plinio se ocupa en el libro II del mundo en general, del cielo, de los astros (estrellas, Sol, Luna y planetas), de los fenómenos meteorológicos y de la Tierra. Muñoz llega sólo hasta el estudio de la Luna.

Según Navarro, Muñoz parece servirse de la obra de Plinio para sumarse "al esfuerzo de un grupo de profesores valencianos en pro de un mayor pluralismo doctrinal en la filosofía natural". Sus ideas cosmológicas se separan en aspectos importantes de la tradición aristotélico-escolástica y, en gran medida, son afines a la tradición estoica.

El estudio sitúa la obra de Muñoz en el contexto de la crisis renacentista, traza el perfil de un astrónomo en la España del siglo XVI (incluyendo el resultado de un estudio prosopográfico comparado de 110 personajes de la época que cultivaron la astronomía) y analiza la repercusión de la obra de Muñoz en España y en el resto de Europa.

La edición crítica se basa en dos manuscritos: uno autógrafo, AM 812 4, fols. 1-47, del Arnamagnaeanske Institut de Copenhague y una copia incompleta, Clm 10.674, 341r-371r, de la Bayerische Staatsbibliothek de Munich. A cada página de la edición corresponde, enfrentada, la página de la traducción con notas al pie, facilitando la comparación con el texto latino.

El volumen reproduce algunas ilustraciones de las obras manuscritas y añade índices onomásticos del estudio y del texto editado. La bibliografía recoge fuentes primarias, escritos y correspondencia de Muñoz y una amplia literatura secundaria.

El libro añade al análisis del contenido de los *Comentarios a Plinio* el atractivo de la edición y la traducción del texto original, aporta la primera descripción detallada de un buen número de obras de Muñoz que se conservan en forma manuscrita y reafirma conclusiones sobre Muñoz y sobre la actividad astronómica del XVI que V. Navarro ya había avanzado en artículos anteriores.

—ROSER PUIG

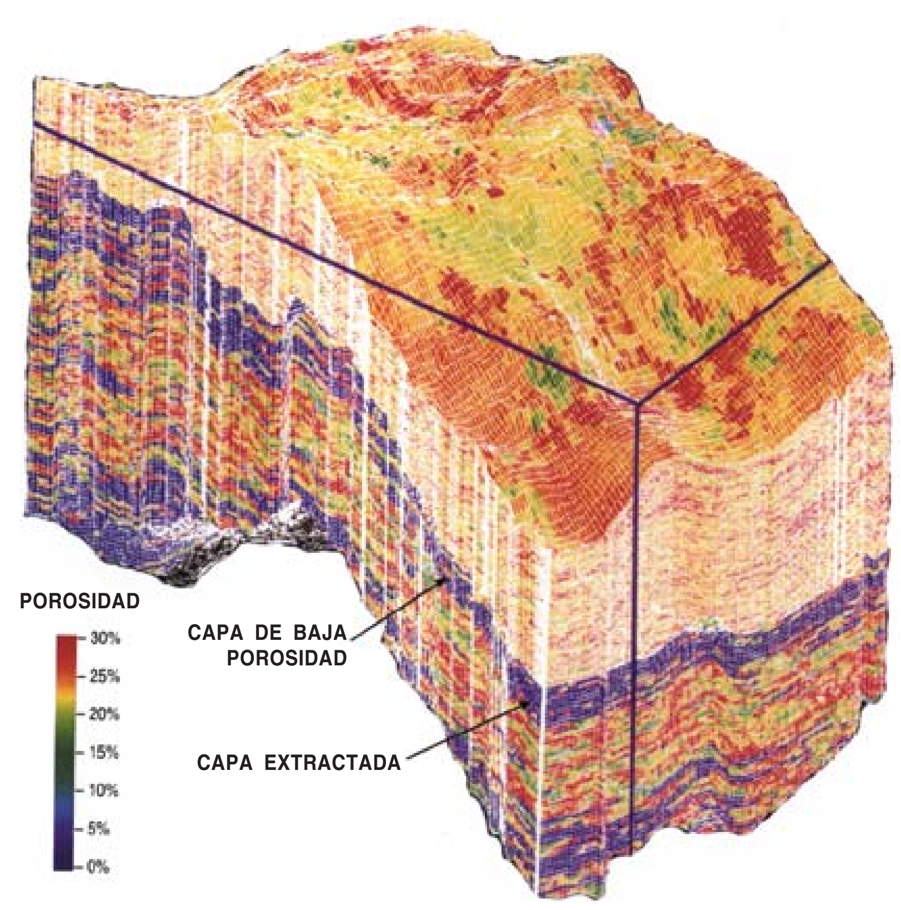
cho mayor. Con ellos se mide la densidad, elasticidad, conductividad y múltiples propiedades más del interior terrestre. Su sismicidad.

Las ondas sísmicas —vibraciones de las rocas— se propagan a través de la Tierra. No suelen viajar en línea recta, sino desviadas, por refracción y reflexión en el medio. Las ondas estudiadas en sismología alcanzan velocidades medidas en kilómetros por segundo y frecuencias de unas decenas de hertz. La velocidad sísmica aumenta con la profundidad. Sin embargo, en su trayectoria, aparecen discontinuidades, indicio de fronteras entre cuerpos con diferentes propiedades y cuya naturaleza aprehendemos por el tipo de ondas registrado. Distinguimos entre ondas P y ondas S, asociadas aquéllas a ondas de presión y las S a ondas de cizalladura.

Si la sismología de refracción es un método poderoso para descubrir las profundidades de las interfases horizontales, la sismología de reflexión nos revela los pliegues y las fallas. Rama importante de la sismología de reflexión es la estratigrafía sísmica. El geofísico recurre a la gravedad para detectar diferencias laterales en las densidades de las rocas subsuperficiales.

La Tierra (*Earth Systems*) no es una esfera perfecta. Debe su abultamiento ecuatorial a la fuerza centrífuga del movimiento de rotación. Tiene una densidad general de 5,5 gramos por centímetro cúbico y un intenso campo magnético dipolar debido a su núcleo rico en hierro. Posee, caso único entre los planetas rocosos interiores, continentes y cuencas oceánicas. La ciñe una atmósfera constituida por nitrógeno (78 por ciento) y oxígeno (21 por ciento) con menor cuantía de dióxido de carbono y concentraciones apenas reseñables de gases nobles y especies volátiles.

La estructura de la Tierra refleja su desarrollo originario por acreción heterogénea a partir de planetisima-



Inspección tridimensional de reflexión sísmica del campo de Forties, en el mar del Norte

les (meteoritos, asteroides y cometas) y su evolución física y química consiguientes, activadas por el calentamiento, la circulación dinámica y la liberación de energía desde el interior profundo. La Tierra incorporó material que se había condensado con anterioridad a grandes distancias heliocéntricas, además del material situada a 1 UA. En ese modelo de acreción heterogéneo en torno al 15 por ciento de material exógeno oxidado se agregaría al material propio reductor y refractario.

La corteza continental, rica en sílice, álcalis, volátiles y elementos radiactivos, se caracteriza por rocas graníticas y alcanza un espesor de entre 20 y 60 kilómetros. La corteza oceánica, rica en calcio, hierro y magnesio, contiene sólo modestas cantidades de potasio y sodio (y menores cantidades de silicio en comparación con la corteza continental); casi exclusivamente basáltica, alcanza unos 5 kilómetros de potencia. La corteza representa sólo el 1 por ciento del volumen de toda la Tierra y en torno el 0,4 por ciento de su masa.

En dirección hacia el centro, por debajo del exterior rocoso, encontramos un manto de silicato de magnesio y capas ricas en óxido de creciente densidad (*The Earth's Mantle*). La frontera más o menos horizontal entre la corteza y el manto subyacente se denomina discontinuidad de Mohorovicic ("Moho" o "M"). En esa linde, la velocidad de las ondas P se acelera de menos de 7 km/seg a más de 7,6 km/seg. Corteza y manto son sólidos; las ondas S viajan por ambos. Alcanza esa discontinuidad un espesor limitado, donde los materiales de la corteza superior y el manto inferior se entrecruzan, si bien las propiedades físicas y químicas del manto subyacente difieren notablemente de las de la corteza superior.

En su integridad, el manto representa la mayor proporción de la Tierra, un 83 por ciento en volumen y 68 por ciento en masa. Con respecto a la corteza es rico en magnesio y menos rico en hierro y contiene bastante menos silicio; el manto carece de elementos volátiles y radiactivos. Consta de diversas capas jerarquizadas. La capa superior, bastante rígida, forma, con la capa rígida de la corteza, la litosfera, que cubre el planeta entero y se divide en siete placas gigantes.

Bajo la litosfera se aloja una capa de manto mucho más dúctil, la astenosfera. Su límite superior con la litosfera es bastante brusco, en una potencia de varios kilómetros; pero la astenosfera va cambiando gradualmente en un manto más rígido, a una profundidad de unos 220 kilómetros. El manto superior consta de litosfera, astenosfera y material del manto rígido hasta profundidades de 300 o 400 kilómetros. En la zona de transición subsiguiente, situada entre los 400 y 670 kilómetros de profundidad, las propiedades físicas del manto superior cambian con la profundidad. La gradual emergencia de características físicas casi constantes señala el paso hacia el manto inferior. Esta capa interna y más voluminosa del manto se muestra más o menos homogénea a una profundidad de 2900 kilómetros, en la frontera con el núcleo de la Tierra.

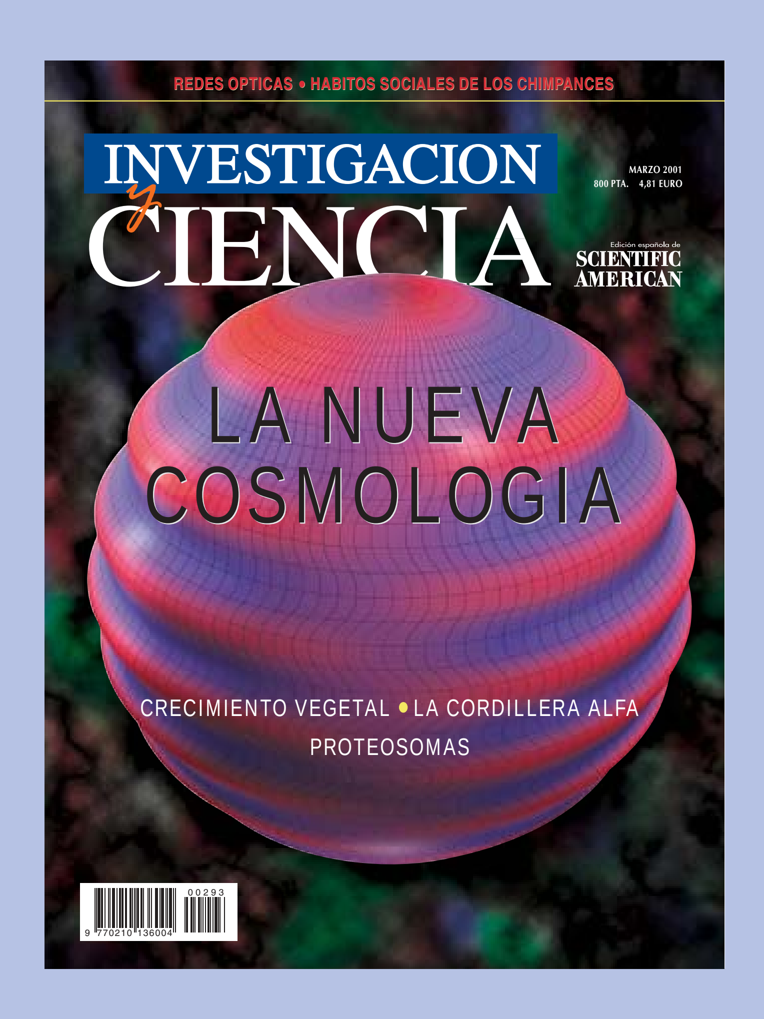
Mediante la superposición de dos modos principales empezamos a conocer el proceso de convección del manto. A escala de placa domina un flujo promovido por la inestabilidad gravitatoria de la capa fronteriza fría de la litosfera. Las plumas representan el segundo modo, subsidiario, de la convección del manto; brotan de las inestabilidades de una capa fronteriza inferior más caliente.

Las pruebas petrológicas y sísmicas indican que el grueso del manto es un sólido cristalino. Pero las tensiones pueden producir una deformación irreversible o deslizamientos. Se habla así de deslizamiento por difusión, en el cual el grado de deformación es proporcional a la tensión, y deslizamiento por dislocación, en el cual el grado de deformación es proporcional a una fuerza de tensión más alta.

El límite núcleo-manto y una fina zona del manto basal denominada D^{n} representa una capa de cambio profundo en la constitución de los materiales de la Tierra. El núcleo metálico consiste en una aleación de hierro-níquel, una capa fundida en sus porciones externas separada por una discontinuidad de una esfera sólida de hierro-níquel en su masa central. Se supone que el núcleo externo fundido ocupa el 15 por ciento del volumen de la Tierra; el núcleo cristalino interior, el 1 por ciento restante. Debido a su gran densidad, el núcleo supone más del 31 por ciento de la masa de la Tierra.

LUIS ALONSO

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



INFORME ESPECIAL: REDES OPTICAS

EL TRIUNFO DE LA LUZ, por Gary Stix
Mediante ampliaciones con técnicas de fibra óptica, las redes van a alcanzar capacidades rayanas en lo infinito.

CABLEADO OPTICO, por David J. Bishop, C. Randy Giles y Saswato R. Das
Con la sustitución de conmutadores electrónicos por otros de naturaleza óptica, las redes transmitirán billones de bits por segundo.

DISTRIBUCION DE PAQUETES OPTICOS, por Daniel J. Blumenthal
Si queremos crear una red óptica genuina necesitaremos técnicas avanzadas que utilicen una onda luminosa para transferir a otra la información.

PROTEOSOMAS, por Alfred L. Goldberg, Stephen J. Elledge y J. Wade Harper
Estas estructuras del interior celular constituyen verdaderos centros de destrucción de proteínas. A su actividad frenética, o a su absoluta inactividad, se deben numerosas enfermedades.

REGULADORES DEL CRECIMIENTO VEGETAL, por Teresa Altabella y Antonio F. Tiburcio
Los reguladores del crecimiento transmiten a las células los mensajes necesarios para que su desarrollo y diferenciación en tejidos y órganos sean procesos coordinados. ¿Cuáles son los hitos de esa vía transmisora?

LAS CULTURAS DE LOS CHIMPANCES, por Andrew Whiten y Christophe Boesch
Nuestros parientes inmediatos nos son más cercanos de lo que pensábamos. Algunos de sus comportamientos se asimilan a hábitos sociales que se transmiten de generación en generación.

ECOS DE LA GRAN EXPLOSION, por Robert R. Caldwell y Marc Kamionkowski
En la débil marejadilla de las ondas gravitatorias podría adivinarse el comienzo del universo.

UN CARTOGRAFIADOR COSMICO, por Charles L. Bennett, Gary F. Hinshaw y Lyman Page
La sonda para la anisotropía de microondas proporcionará a los cosmólogos un cuadro más preciso del universo temprano.

EL UNIVERSO Y SU QUINTAESENCIA, por Jeremiah P. Ostriker y Paul J. Steinhardt
Hay en el universo un invisible campo de energía, responsable de la aceleración de su expansión.

ADENTRANDONOS EN LA ENERGIA OSCURA, por Pilar Ruiz Lapuente
Un nuevo nivel de precisión en el estudio de la energía que acelera la expansión del universo ayudará a discernir entre diferentes teorías propuestas para la unificación de las fuerzas fundamentales y podría revelar la presencia de nuevas partículas.

COHERENCIA DE LA COSMOLOGIA ACTUAL, por P. James E. Peebles
¿Existe un sentido subyacente bajo las diversas teorías propuestas?

PLAN B PARA EL COSMOS, por João Magueijo
Si la nueva cosmología falla, ¿cuál es el plan alternativo?

LA CORDILLERA ALFA, por Gert Lange y Wilfried Jokat
Con la expedición del rompehielos “Estrella Polar” pudo estudiarse una poderosa cordillera submarina que se extiende entre el polo Norte y Canadá. Se trata de la estructura más antigua del océano Artico.